

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

## **ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТИПОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ - 1**

Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 141 – "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" освітньої програми "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність"

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньою програмою "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність"

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Електромеханічні системи типових технологічних застосувань - 1: навчальний посібник до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 141 – "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" за освітньою програмою "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність" / КПІ ім. Сікорського; уклад.: М.В. Печеник, С.О. Бур'ян, В.І. Теряєв, С.М. Ковбаса, – Електронні текстові дані (1 файл: 19,7 Мбайт). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.- 96 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(Протокол №4 від 10.12.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

**“ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ТИПОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ЗАСТОСУВАНЬ-1 ”**

Лабораторні роботи

Укладачі Печеник Микола Валентинович, к.т.н., проф.  
Бур'ян Сергій Олександрович, к.т.н., доц.  
Теряєв Віталій Іванович, к.т.н., доц.  
Ковбаса Сергій Миколайович, к.т.н., доц.

Відповідальний редактор Король С.В., канд. техн. наук, доц.

Рецензент Островерхов М.Я., д-р. техн. наук, проф.

Навчальний посібник включає методичні матеріали щодо виконання та оформлення лабораторних робіт з кредитного модуля “Електромеханічні системи типових технологічних застосувань-1” для освітньої програми "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність" денної форми навчання спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

## Зміст

Вступ	5
Лабораторна робота № 1. Дослідження статичних характеристик відцентрової насосної установки	6
Лабораторна робота № 2. Дослідження замкненої системи керування тиском відцентрової насосної установки	22
Лабораторна робота № 3. Дослідження енергетичної ефективності вентиляторної установки при різних способах керування швидкістю повітряного потоку	34
Лабораторна робота № 4. Дослідження електроприводу макету ліфтової підйомної установки	47
Лабораторна робота № 5. Дослідження енергетичних характеристик стрічкового конвеєра	84
Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт в лабораторії «Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів»	92
Список рекомендованої літератури	94

## ВСТУП

Дисципліна “Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів” є однією з ключових при підготовці фахівців за напрямком “Електромеханіка”. Вона тісно переплетена з базовими дисциплінами “Теорія автоматичного керування”, “Теорія електроприводу” та “Автоматизація електромеханічних систем”, при цьому роблячи більший акцент на практичне використання зазначених дисциплін щодо конкретних механізмів загальнопромислового призначення. Лабораторний практикум з дисципліни “Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів” покликаний закріпити теоретичні знання, отримані на лекціях, та виробити практичні навички у майбутніх фахівців електромеханіків з налаштування, обслуговування та експлуатації сучасних мікроконтролерних електромеханічних систем автоматизації насосних, вентиляторних та ліфтових установок. В процесі занять студенти отримують досвід роботи з програмування та використання інтелектуальних перетворювачів частоти фірм АВВ та Lenze, зняття статичних та динамічних характеристик вище зазначених установок, реалізації розімкнених та замкнених систем керування технологічними параметрами та систем захисту і моніторингу. Отриманні знання є необхідним базисом для розробки реальних електромеханічних систем автоматизації під час написання дипломних проектів кваліфікаційного рівня бакалавр, спеціаліст та магістр.

Перетворювачі частоти Lenze 8200 Vector до лабораторних робіт № 1,2 та 3, а також контрольно-вимірювальне обладнання, комутаційне обладнання, елементи керування та сигналізації та аналоговий датчик витрат Kobold до лабораторної роботи № 1 надані компанією СВ АЛЬТЕРА у якості спонсорської підтримки для розвитку лабораторій кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ». Електрообладнання макету ліфтової підйомної установки у порядку спонсорської допомоги надано фірмою «Папутсіс» (Греція).

## Лабораторна робота №1

# ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

**Мета роботи** – дослідити статичні характеристики відцентрової насосної установки в розімкненому за тиском стані при частотному та векторному керуванні.

### 1.1. Основні теоретичні відомості

#### Загальні відомості про насосні установки.

Насосні установки широко використовуються в різних галузях промисловості, енергетики, сільського та комунального господарств. Найбільшого розповсюдження отримали насоси відцентрового типу. В них поступальний рух рідини забезпечується відцентровими силами, що виникають при обертанні потоку рідини з певною швидкістю всередині насосу. Насоси, у більшості випадків, комплектуються привідними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором.

Робота насосу характеризується його продуктивністю (подачею)  $Q$ , яка визначається об'ємом рідини, яку перекачує насос в одиницю часу. Напором насосу  $H$  (фактично величина, пропорційна різниці тисків рідини на вході і виході насосу) називається приріст питомої енергії потоку рідини при проходженні через його робочі колеса. Напір насосу витрачається на подолання сил протитиску в напірному резервуарі, геометричну висоту підйому  $H_z$  і подолання опору трубопроводів.

Статичні характеристики відцентрових насосів апроксимуються параболічними залежностями (рис. 1.1, *a*) та мають назву  $Q$ - $H$  характеристик.

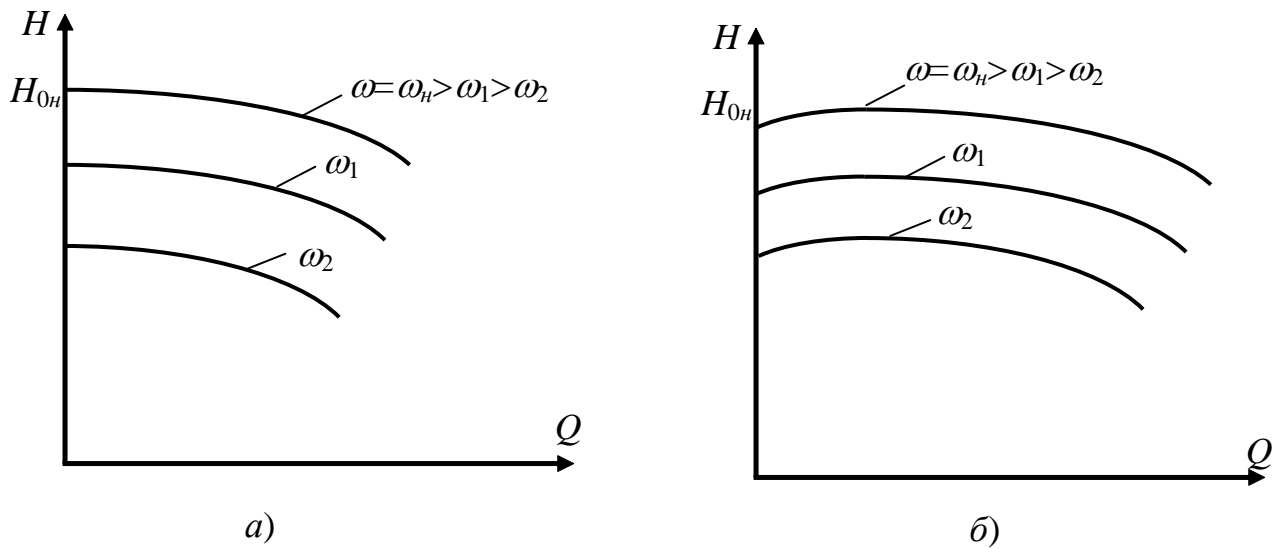


Рис. 1.1. Статичні характеристики відцентрових насосів

При відхиленні кута входження потоку в насос (регулюється спрямовуючим апаратом) від оптимального на характеристиках з'являється точка екстремуму (рис. 1.1, б).

Відповідно до рис. 1.1, а

$$H = H_{0n} \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - a_n Q^2, \quad (1.1)$$

де  $\omega$  – швидкість обертання насосу;  $\omega_n$  – номінальне значення швидкості;  $H_{0n}$  – напір при нульовій подачі та номінальній швидкості;  $a_n$  – гідравлічний опір насосу.

Статичні характеристики гідравлічної мережі (рис. 1.2) також апроксимуються параболою

$$H = H_{ct} + aQ^2, \quad (1.2)$$

де  $H_{ct}$  – напір при нульовій подачі насосу (фактично  $H_z$ );  $a$  – гідравлічний опір мережі.

Величина гідравлічного опору насосу визначається на основі номінальних даних

$$a_n = \frac{H_{0n} - H_n}{Q_n^2}. \quad (1.3)$$

Розрахункове значення гідравлічного опору мережі визначається наступним чином

$$a = \frac{H_p - H_{ст}}{Q_p^2}, \quad (1.4)$$

де  $H_p$ ,  $Q_p$  – напір та продуктивність у робочій точці.

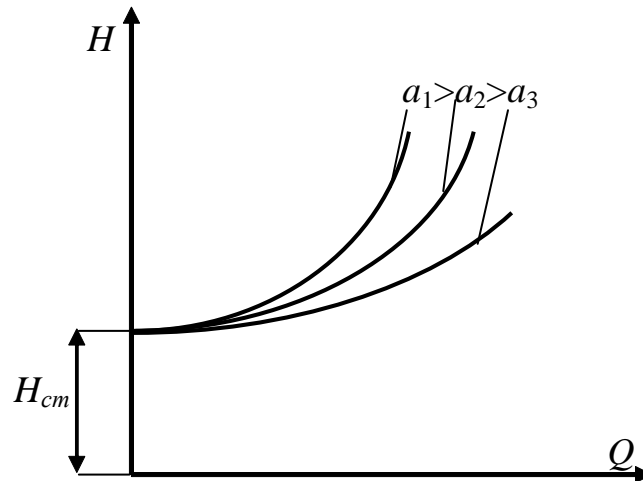


Рис. 1.2. Статичні характеристики гідравлічної мережі

Робоча точка насосу А визначається перетином напірної характеристики насоса та характеристики мережі (рис. 1.3).

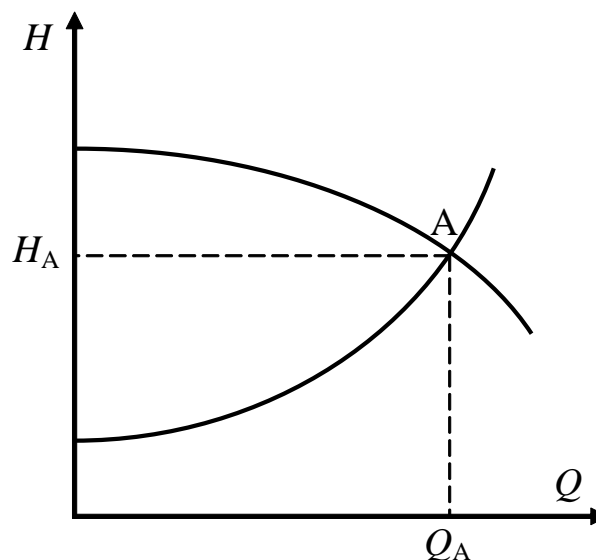


Рис. 1.3. Робоча точка насосу у площині статичних характеристик

Таким чином, змінювати положення робочої точки – регулювати подачу чи напір можна двома основними способами: змінюючи гідравлічний

опір мережі а засувкою або змінюючи швидкість обертання насосу  $\omega$ . Другий спосіб забезпечує більш ефективне використання енергії для приводу насосу, але вимагає більше капітальних затрат.

Розв'язуючи рівняння (1.1) і (1.2) аналітично, можна отримати величину продуктивності

$$Q = \sqrt{\frac{H_{0H} \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 - H_{ст}}{a + a_{\phi}}}, \quad (1.5)$$

Якщо прийняти, що площі перерізу напірного та всмоктуючого трубопроводів однакові, а складні перехідні процеси в насосі та трубопроводах апроксимувати аперіодичною ланкою, то диференціальне рівняння, яке описує насос при керуванні швидкістю матиме вигляд

$$\chi \frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 - H_{ст} - (a_H + a) Q^2, \quad (1.6)$$

де  $\chi$  – стала інтегрування насосу;  $H_{ст}$  – геодезична висота підйому води.

Момент на валу насоса визначається наступним чином

$$M_{ст} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{нас} \omega}, \quad (1.7)$$

де  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\eta_{нас}$  – ККД насоса.

Вибір насоса здійснюється на основі вимог щодо його продуктивності та напору, використовуючи каталожні напірні характеристики, на яких зображено залежності  $H=f(Q)$  при різних значеннях швидкості обертання та лінії сталого значення ККД (рис. 1.4).

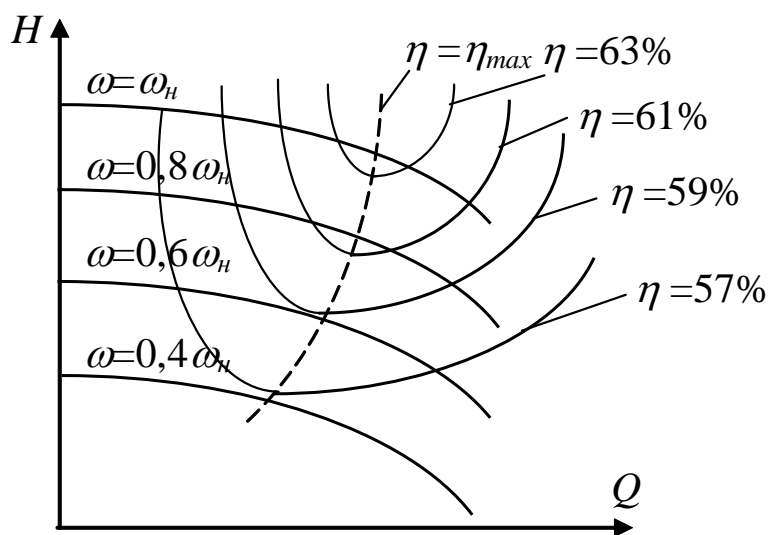


Рис. 1.4. Каталогні характеристики насосу

Знаючи задані величини  $Q$  і  $H$ , необхідно вибрати такий тип насосу, щоб робоча точка знаходилась максимально близько до лінії максимального ККД і характеристики  $Q-H$  при номінальних обертах.

Інакше, будуть великі втрати енергії (для насосів допускається відхилення ККД  $\pm 7\%$  від максимально-можливого значення), а для забезпечення заданої точності технологічних параметрів прийдеться або підточувати діаметри коліс насосу, чи вводити передаточні пристрої для узгодження швидкостей насосу і двигуна, що також знижує ККД.

Оскільки насоси працюють безперервно, то потужність привідного двигуна визначається для режиму  $S_1$  наступним чином

$$P = k \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (1.8)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу (1,2÷1,4), а  $Q$ ,  $H$ ,  $\eta_{\text{нас}}$  – значення відповідних параметрів в робочій точці.

Значення  $Q$  і  $H$  при номінальних обертах насосу і  $\eta_{\text{нас}} = \eta_{\text{max}}$  прийнято називати номінальними  $Q_n$  і  $H_n$ . Тип двигуна бажано обирати таким, щоб номінальні швидкості насосу і двигуна збігалися.

## 1.2. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка представляє собою стенд, на передній панелі якого розміщені перемикачі S1, S2 та S3, потенціометр R1, цифрові міліамперметри PA1 та PA2, цифровий вольтметр PV1, автоматичний вимикач QF та перетворювач частоти марки Lenze зі вбудованим ПІД-регулятором, задатчиком інтенсивності, векторним та частотним керуванням та можливістю реалізації замкненої системи керування. Схема функціональна представлена на рис. 1.5.

Біля стенду знаходиться насос марки Calpeda MXH 202E з асинхронним двигуном M потужністю 0,33 кВт, який встановлено на металеву плиту для усунення вібрацій насосу на високих частотах та під'єднано до перетворювача частоти Lenze 8200 Vector потужністю 0,75 кВт. На вході насоса розміщено фітінг, до якого приєднано манометр для візуальної фіксації тиску у трубі, витратомір ДQ1 з імпульсним виходом та аналоговий датчик витрат ДQ2 з струмовим виходом. Всі інші отвори фітінга закриті заглушками та загерметизовані. Лічильник витрат з'єднаний через гнучку трубу із нижнім отвором першого резервуару. Останній представляє собою пластиковий бак ємністю 200 літрів. Усі труби мають діаметр 1 дюйм (2,54 сантиметри) та довжину 1 метр. На виході насоса знаходиться другий фітінг, до якого приєднані манометр та датчик тиску ДН зі струмовим виходом, який під'єднано через міліамперметр до перетворювача частоти для реалізації замкненої системи керування тиском. Для запобігання зворотному ходу води у насос на виході фітінгу розташований зворотний клапан, до якого кріпиться третій фітінг. До нього кріпляться кран В1, що трубою з'єднаний із одним із верхніх отворів першого резервуару, та інша труба, що через кран В2 та трубу під'єднується до нижнього отвору другого резервуару, який знаходиться на висоті 1,5 метра над насосом для збільшення тиску в системі. Верхній отвір цього резервуару через дві труби та кран В3 з'єднаний із одним з верхніх отворів першого резервуару.

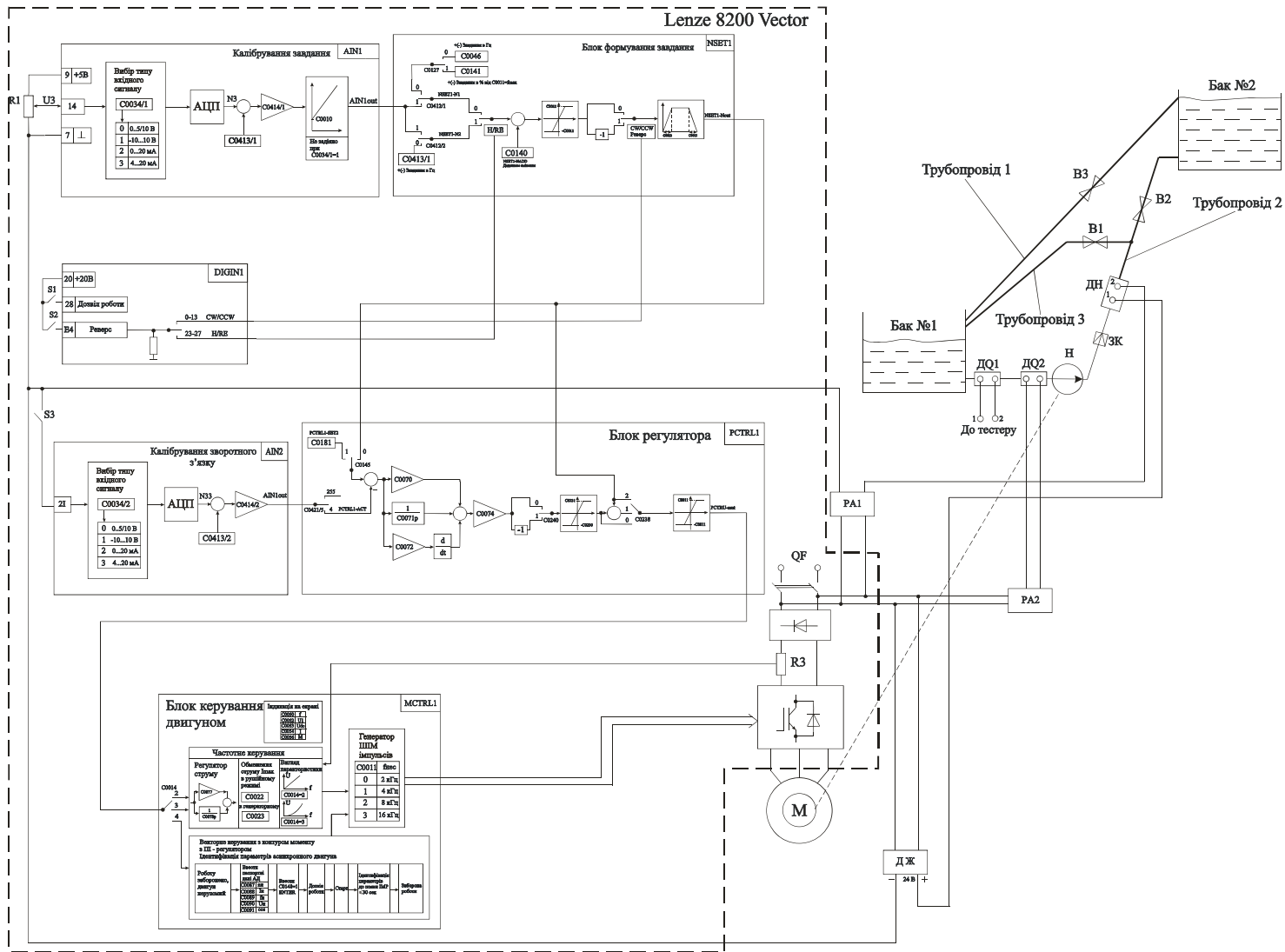


Рис. 1.5. Схема функціональна лабораторного стенду

### 1.3. Програма роботи

1. Ознайомитись з технологічною схемою системи водопостачання, схемою функціональною системи автоматичного керування та правилами програмування параметрів перетворювача частоти.

2. Встановити у перетворювачі частоти заводські настроювання параметрів, занести паспортні дані двигуна в параметри **C0087 – C0091**, провести ідентифікацію параметрів асинхронного двигуна насосу.

3. Налаштувати параметри перетворювача частоти на частотне керування  $u/f = \text{const}$  без зворотного зв'язку за тиском та експериментально зняти при двох величинах завдання частоти напірні характеристики насосу  $H = f(Q)$ , характеристики споживаної потужності насосу  $P = f(Q)$ , ККД насосу  $\eta = f(Q)$ . Побудувати отримані залежності.

4. Налаштувати параметри перетворювача частоти на частотне керування  $u/f^2 = \text{const}$  без зворотного зв'язку за тиском та експериментально зняти при двох величинах завдання частоти напірні характеристики насосу  $H = f(Q)$ , характеристики споживаної потужності насосу  $P = f(Q)$ , ККД насосу  $\eta = f(Q)$ . Побудувати отримані залежності.

5. Налаштувати параметри перетворювача частоти на векторне керування двигуном без зворотного зв'язку за тиском та експериментально зняти при двох величинах завдання частоти напірні характеристики насосу  $H = f(Q)$ . Побудувати отримані залежності.

6. Налаштувати параметри перетворювача частоти на частотне керування  $u/f^2 = \text{const}$  без зворотного зв'язку за тиском та експериментально зняти характеристики гідравлічної мережі  $H = f(Q)$  при перекачуванні води з нижнього бака у нього ж при повністю відкритому вентилі та напівзакритому. Експериментально визначити частоту при якій відкривається зворотний клапан. Визначити характеристику навантаження на валу двигуна  $M_c = f(\omega)$ .

7. Налаштувати параметри перетворювача частоти на частотне керування  $u/f^2 = \text{const}$  без зворотного зв'язку за тиском. Виставити максимально можливе завдання. Повністю відкрити вентиль для перекачування у нижній бак, вентиль для перекачування у верхній бак закрити. Двома способами отримати 80% витрат води: шляхом зменшення швидкості і шляхом запирання вентиля. Порівняти споживані насосом потужності та ККД насосу у цих двох робочих точках та визначити економію потужності.

8. Підготувати звіт і робити висновки по роботі.

#### 1.4. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Переконайтеся, що перемикачі S1-S3 знаходяться у лівому положенні. Ввімкнути автомат QF, перетворювач частоти вмикається. Щоб отримати доступ до зміни усіх параметрів необхідно натиснути клавішу «**1-2**» (перехід у ряд функцій «**2**») на пульті перетворювача частоти, перейти до напису «**User**», змінити його на «**All**» шляхом натиснення клавіші «**↑**» та зберегти, натиснувши «**Enter**». Далі необхідно повернутися у ряд функцій «**1**», натиснувши клавішу «**1-2**».

Для встановлення заводських значень параметрів у перетворювачі частоти необхідно:

- зняти сигнал дозволу роботи;
- вибрати клавішами «**←**» та «**→**» меню «**Code**»;
- вибрати клавішами «**↑**» та «**↓**» номер параметра **C0002**;
- перейти за допомогою «**→**» до зміни величини параметру «**Para**»;
- встановити за допомогою «**↑**» та «**↓**» величину «**1**»;
- натиснути «**Enter**».

Ідентифікація параметрів асинхронного двигуна можлива лише в режимі векторного керування, тому по технології, яка описана вище, потрібно:

- встановити параметр **C0014=4**;
  - зняти дозвіл роботи перетворювача і переконатись що двигун не обертається;
  - ввести паспортні дані двигуна  $n_n \rightarrow \text{C0087}$ ;  $I_n \rightarrow \text{C0088}$ ;  $f_n \rightarrow \text{C0089}$ ;  
 $u_n \rightarrow \text{C0090}$ ;  $\cos \varphi \rightarrow \text{C0091}$ ;
  - встановити параметр **C0148=1** і натиснути «**Enter**»;
  - ввімкнути перемикач S1 (активувати дозвіл роботи) та натиснути кнопку «**Run**» на панелі перетворювача;
  - ідентифікація параметрів двигуна проходить приблизно 30 секунд і завершується, коли активний «**IMP**»;
  - зняти дозвіл роботи (вимкнути S1).
2. Для налаштування параметрів перетворювача частоти на частотне керування  $u/f = \text{const}$  без зворотного зв'язку за тиском необхідно встановити наступні значення параметрів:
- **C0010=0 Гц** – мінімальна вхідна частота;
  - **C0011=50 Гц** – максимальна частота 50 Гц;
  - **C0012=5 с** – час розгону 5 секунд;
  - **C0013=5 с** – час гальмування 5 секунд;
  - **C0014=2** – активація частотного керування  $u/f = \text{const}$  ;
  - **C0034/1=0** – аналоговий вхід завдання 0...5 В;
  - **C0034/2=3** – аналоговий вхід 2I калібрується в діапазоні 4-20 mA для узгодження з датчиком тиску (хоча в даному випадку зворотний зв'язок не використовується, коло необхідне для протікання струму через міліамперметр на виході датчика тиску);
  - **C0111=4** – на вольтметр PV1 через аналоговий вихід X3/62 буде виводитися напруга, що пропорційна активній потужності двигуна;
  - **C0140=0 Гц** – зміщення завдання частоти відсутнє;
  - **C0238=2** – завдання частоти надходить в блок керування двигуном, минуючи регулятор;

- **C0412/1=1** – сигнал завдання частоти поступає з аналогового входу «1u» (згідно заводських налаштувань  $H/RE=0$ );
- **C0413/1=0** – зміщення сигналу завдання відсутнє;
- **C0414/1=100%** – коефіцієнт підсилення вхідного сигналу дорівнює 1.

Після того, як внесено усі параметри, необхідно дати дозвіл роботи перетворювача частоти. Переконавшись, що повністю відкрито вентиль В1 (або В2), можна натискати кнопку «**Run**» і за допомогою потенціометра встановити максимальну вихідну частоту 50 Гц.

Величини завдань частоти у залежності від номерів бригад зведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Значення величини частоти завдання

№ бригади	1	2	3	4
$f_{31}$ , Гц	50	50	50	50
$f_{32}$ , Гц	45	40	35	30

Перевішивши перемикач S2 у положення «Назад», необхідно візуально спостерігати за потоком води і вибрати напрямок, при якому потік сильніший (правильний напрямок обертання з лопатками, загнутими назад). Для зняття характеристик необхідно встановити задане значення частоти і змінюючи положення шарового крану (вентиля) змінювати величину витрат води (положення робочої точки). Необхідно записувати наступні дані:

- покази міліамперметра PA1, пропорційні напору  $H$ ;
- покази міліамперметра PA2, пропорційні витратам  $Q$ ;
- напругу на двигуні  $u_1$  – **C0052**;
- струм статора  $I_1$  – **C0054**;
- вхідну частоту  $f$  – **C0050**;
- покази вольтметра PV1, пропорційні активній потужності двигуна.

Вимірювання витрати за допомогою імпульсного датчика проводиться наступним чином. До його виходів, що під'єднані до клем, підключається мультиметр в режимі вимірювання опору. При проходженні води через датчик, через кожні 10 літрів між його виходами з'являється короткочасне замикання. Необхідно виміряти час між двома замиканнями  $t_3$ , тоді  $Q = 10 \text{ л} / t_3$ . Усі виміряні величини заносяться до таблиці 1.2. Необхідно зняти не менше 15 точок при частоті 50 Гц та не менше 10 при частоті, меншій за 50 Гц.

Таблиця 1.2. Таблиця для внесення вимірних величин.

№ п.п.	$I_{PA1}$ , mA	$I_{PA2}$ , mA	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$I_{PA2}$ , mA	$Q$ , л/с	$t_3$ , с	$U_{PV1}$ , В	$f$ , Гц

Приблизний вигляд характеристик представлено на рисунку 1.6.

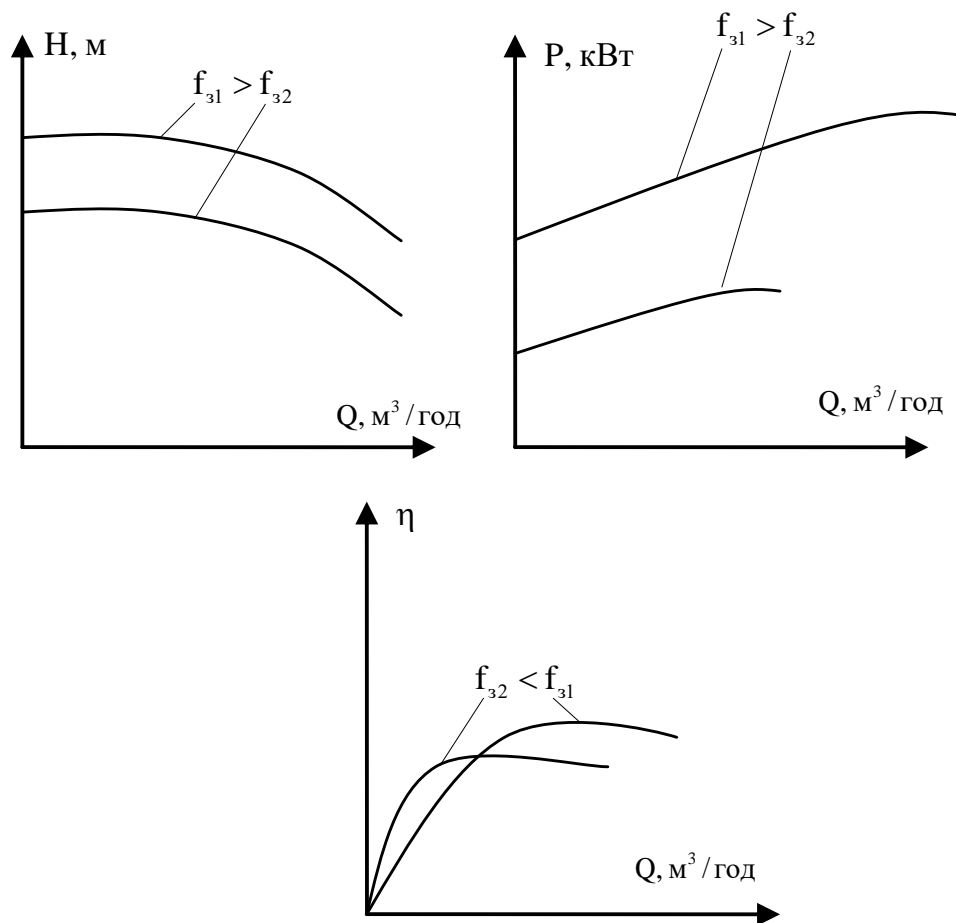


Рисунок 1.6. Приблизний вид характеристик

Бари необхідно перевести в метри (1 бар – 10 метрів водяного стовпа), літри за секунду перевести в  $\text{м}^3/\text{с}$  (1 літр за секунду –  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Напір, що створює насос, пропорційний показам міліамперметра PA1 з вихідним сигналом 4-20 mA, причому 6 барам тиску ( $H_{\text{max}}$ ) відповідає 20 mA ( $I_{\text{max}}$ ). Виходячи з цього формула для перерахунку струму у напір наступна

$$H = \frac{10 \cdot (I_{\text{PA1}} - 4) \cdot H_{\text{max}}}{I_{\text{max}} - 4}.$$

Продуктивність насосу за показами імпульсного датчика витрат

$$Q = \frac{10 \cdot k}{t_3}.$$

де  $k = 0.001$  – коефіцієнт приведення л/с у  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Продуктивність насосу за показами аналогового датчика витрат обраховується аналогічно як для тиску, причому  $4 \text{ м}^3/\text{год}$  відповідає 20 mA

$$Q = \frac{(I_{\text{PA1}} - 4) \cdot Q_{\text{max}}}{I_{\text{max}} - 4}.$$

Для побудови напірної характеристики потрібно перевести витрати із  $\text{м}^3/\text{с}$  у  $\text{м}^3/\text{год}$ , тобто домножити значення  $Q$  на 3600.

Потужність, яку споживає насос разом з приводом

$$P = \frac{P_n \cdot U_{\text{PV1}}}{U_{\text{PV1н}}},$$

де  $U_{\text{PV1н}} = 3 \text{ В}$  – номінальне значення напруги вольметра PV1, що пропорційна номінальній потужності перетворювача частоти,  $P_n$  – номінальна потужність перетворювача частоти.

Коефіцієнт корисної дії системи двигун-насос

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P},$$

де  $P$  в Вт;  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$  – густина води;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $Q$  – в  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – в м.

Усі розраховані дані необхідно записати у таблицю 1.3.

Таблиця 1.3. Розраховані значення для побудови статичних характеристик

№ п.п.	H, м	Q, м <sup>3</sup> /ГОД	Q <sub>РА2</sub> , м <sup>3</sup> /ГОД	P, Вт	η, %

По завершенні експериментів необхідно натиснути кнопку «Стоп» та зняти дозвіл роботи.

3. Пункт 4 програми виконується аналогічно, як і пункт 3, лише в параметрі **C0014** необхідно виставити код 3 – частотне керування  $u/f^2 = \text{const}$ .

4. Пункт 5 програми виконується аналогічно, як і пункт 3, лише в параметрі **C0014** необхідно виставити код 4 – векторне керування та знімати лише напірні характеристики.

5. Налаштування перетворювача частоти для пункту 6 програми роботи такі ж як і у пункті 4 програми. Експеримент проводиться наступним чином: фіксується потрібне положення вентиля (крану) і змінюється лише величина завдання частоти. Записуються наступні покази:

- покази міліамперметра РА1, пропорційні H;
- покази міліамперметра РА2, пропорційні Q;
- витрат води, Q;
- частоти  $f$  – параметр **C0050** (швидкість  $\omega = 2\pi f / p_n$ , де  $p_n$  – кількість пар полюсів);
- статичний момент двигуна M у відсотках від номінального – параметр **C0056**.

Всі дані занести у таблицю 1.4. Необхідно зняти 10 точок при зміні частоти від 50 Гц по 5 Гц за один крок (50, 45, 40 і т.д.)

Таблиця 1.4. Експериментальні дані до п. 6.

№ п.п.	I <sub>РА1</sub> , mA	I <sub>РА2</sub> , mA	Q, л/с	t <sub>з</sub> , с	M <sub>с</sub> , %	f, Гц

Розраховані дані занести у таблицю 1.5.

Таблиця 1.5. Розраховані дані до п. 6.

№ п.п.	Н, м	Q, м <sup>3</sup> /ГОД	Q <sub>РА2</sub> , м <sup>3</sup> /ГОД	M <sub>c</sub> , Н·м	ω, рад/с

Приблизний вигляд характеристик мережі та навантаження на валу двигуна (насоса) показано на рисунку 1.7.

Поступово зменшуючи частоту від максимального значення можливо зафіксувати момент, коли витрати дорівнюють нулю. Частота в цей момент відповідає частоті, при якій відкривається зворотний клапан. Необхідно визначити ці частоти в умовах повністю відкритого крану та напівзакритого.

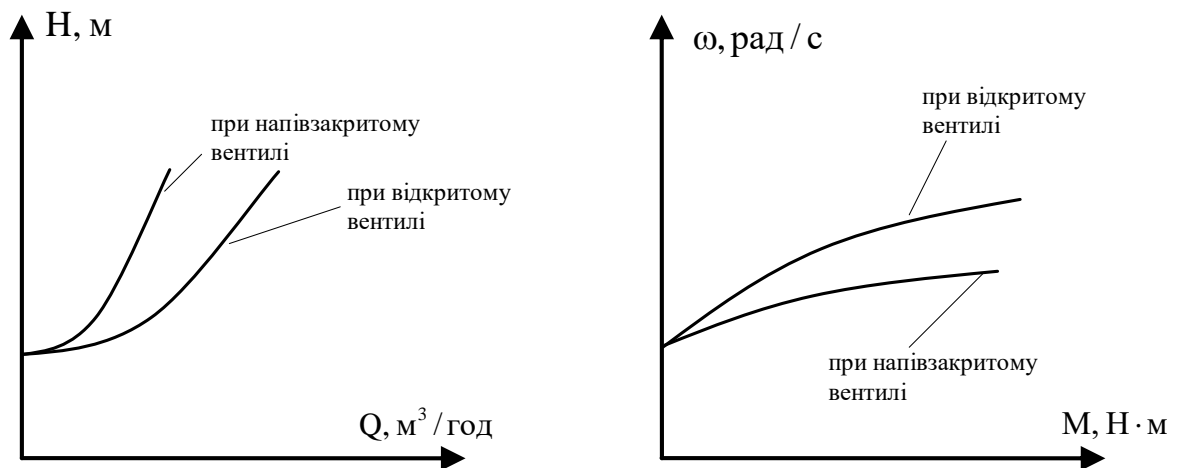


Рисунок 1.7. Приблизний вигляд характеристик

6. Дослідження по пункту програми 7 призначені для порівняння енергоефективності керування продуктивністю (витратами води) насосу за рахунок зміни гідравлічного опору мережі (положення крану) і швидкості обертання насоса. Приблизний вигляд напірних характеристик насоса при даному експерименті показано на рисунку 1.7.

Спочатку встановлюється робоча точка А і вимірюється  $H_A$ ,  $Q_A$ , а також  $u_{1A}$ ,  $I_A$  та  $P_A$  для цієї точки. Тоді

$$\eta = \frac{\rho g Q_A H_A}{P_A}.$$

Зменшуючи частоту, встановлюється робоча точка В, така що  $Q_B = 0,8Q_A$  і вимірюється  $H_B$ ,  $Q_B$ ,  $u_{1B}$ ,  $I_B$  та  $P_B$ . Забезпечення  $0,8Q_A$  можливо, якщо встановити  $f = 0,8 \cdot 50 = 40$  Гц.

Змінюючи положення крана, встановлюється робоча точка С, така що  $Q_C = 0,8Q_A = Q_B$ . Вимірюється  $H_C$ ,  $Q_C$ ,  $u_{1C}$ ,  $I_C$  та  $P_C$ . Необхідно при закриванні крану візуально оцінити, щоб потік води був таким же, як і при зменшенні частоти.

Економія потужності складає

$$\Delta P = P_C - P_B = \rho g \left( \frac{Q_C H_C}{\eta_C} - \frac{Q_B H_B}{\eta_B} \right) = 0,8 Q_A \rho g \left( \frac{H_C}{\eta_C} - \frac{H_B}{\eta_B} \right).$$

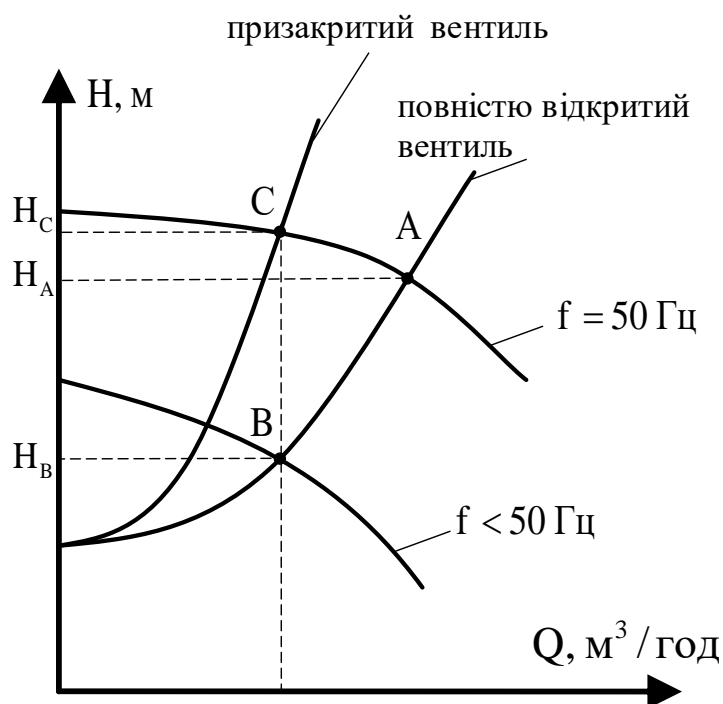


Рисунок 1.8. Порівняння енергоефективності способів керування продуктивністю насоса

## 7. Паспортні дані обладнання.

### **Паспортні дані насосу:**

- модель Calpeda MXH-202E
- максимальний напір 22 м;
- максимальна продуктивність 4,25 м<sup>3</sup>/год;

### **Паспортні дані двигуна:**

- номінальна потужність 0,33 кВт;
- номінальна напруга 380/220 В;
- номінальний струм 1/1,7 А;
- номінальна частота обертання 2800 об/хв;
- номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) 84%;
- номінальний коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) 0,7.

### **Паспортні дані перетворювача частоти:**

- модель Lenze 8200 Vector;
- потужність 0,75 кВт.

## **1.5. Зміст звіту**

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

1. Титульний аркуш.
2. Програма роботи.
3. Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
4. Таблиці зі знятими експериментальними даними.
5. Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
6. Побудовані статичні характеристики.
7. Висновки по виконанню лабораторної роботи.

## 1.6. Контрольні запитання

1. Що називається напірною характеристикою насосної установки та який вона має вигляд?
2. Що таке робоча точка насосу? Що являють собою характеристики гідравлічної мережі?
3. Як здійснити вибір насосу? Що таке каталожні напірні характеристики?
4. Як описується насосна установка у динамічних режимах? Наведіть основні рівняння та залежності.
5. Як зробити ідентифікацію параметрів асинхронного двигуна?
6. Як здійснити налаштування на заводські параметри перетворювача частоти?
7. Як перейти у режими векторного та частотного керування?
8. Що таке датчик інтенсивності та як його налаштувати?

## Лабораторна робота №2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТИСКОМ ВІДЦЕНТРОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

**Мета роботи** – дослідити статичні характеристики відцентрової насосної установки в замкненому за тиском стані при частотному та векторному керуванні; провести математичне моделювання динамічних режимів замкненої системи.

#### 2.1. Основні теоретичні відомості

Структурна схема електромеханічної системи автоматизації насосної установки.

Структурна схема замкненої системи керування напором (продуктивністю) представлена на рис. 2.1.

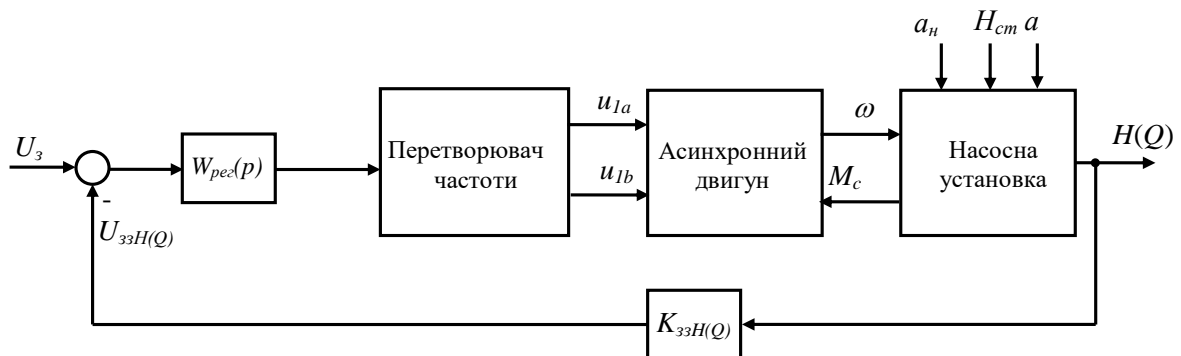


Рис. 2.1. Структурна схема замкненої системи керування напором (продуктивністю) насосної установки

На структурній схемі:  $U_3$  – напруга завдання;  $U_{33H(Q)}$  – напруга зворотного зв'язку за напором (продуктивністю);  $K_{33H(Q)}$  – коефіцієнт

зворотного зв'язку за напором (продуктивністю);  $W_{\text{пер}}(p)$  – передавальна функція регулятора напором (продуктивності).

Розглянемо елементи структурної схеми на рис. 2.1. Насосна установка описується рівняннями (1.1), (1.6) та (1.7) і має вигляд, що зображений на рис. 2.2.

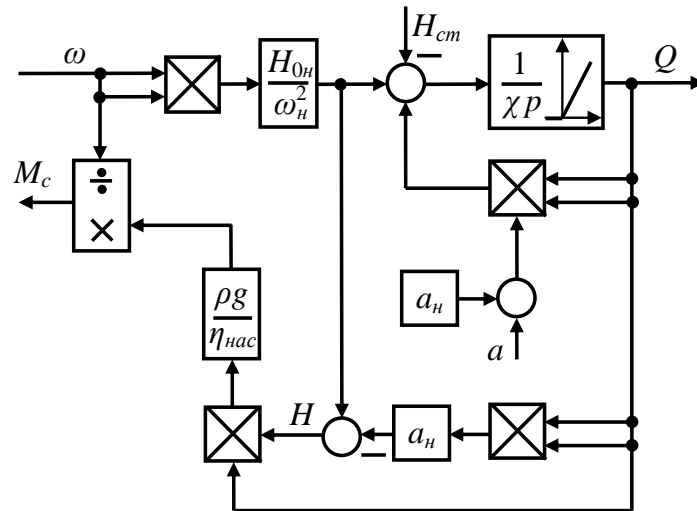


Рис. 2.2. Структурна схема насосної установки

Нелінійність на виході інтегруючого блоку моделює наявність у системі зворотного клапану. Коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{нас}}$  залежить від  $Q$  і  $H$ , але зважаючи на достатньо високу жорсткість механічної характеристики двигуна, викликана зміною  $\eta_{\text{нас}}$  зміна  $M_c$  не призведе до суттєвої помилки. Для спрощення процедури досліджень  $\eta_{\text{нас}}$  приймають рівним максимальному значенню.

Асинхронний двигун описується системою нелінійних диференціальних рівнянь в нерухомій системі координат статора a-b

$$\frac{d}{dt} i_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt} i_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega p_n \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{2a} = -\alpha \psi_{2a} + \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_{12} i_{1a}, \quad (2.3)$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{2b} = -\alpha\psi_{2b} - \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_{12} i_{1b}, \quad (2.4)$$

$$M = \frac{3 L_{12}}{2 L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J_\Sigma} (M - M_{cr}), \quad (2.6)$$

де  $(i_{1a}, i_{1b})^T$ ,  $(u_{1a}, u_{1b})^T$ ,  $(\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$  – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора;  $M$  – електромагнітний момент;  $M_{cr}$  – момент навантаження;  $\omega$  – кутова швидкість;  $L_{12}$  – індуктивність намагнічуючого контуру,  $p_n$  – кількість пар полюсів. Додатні константи з виразів (2.1) – (2.6) визначаються наступним чином:

$$\alpha = R_2 / L_2, \quad (2.7)$$

$$\sigma = L_1 - L_{12}^2 / L_2, \quad (2.8)$$

$$\beta = L_{12} / \sigma L_2, \quad (2.9)$$

$$\gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_{12}, \quad (2.10)$$

де  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  – активні опори та індуктивності статора та ротора,  $J_\Sigma$  – повний момент інерції.

Реально  $J_\Sigma$  є функцією  $Q$  і  $\omega$

$$J_\Sigma = J_d + J_k \frac{1}{i_n^2} + m \frac{Q^2}{s^2 \omega^2}, \quad (2.11)$$

де  $J_k$  – момент інерції коліс насосу;  $J_d$  – момент інерції ротора двигуна;  $i_n$  – передавальне число редуктора (у випадку якщо він присутній у системі);  $s$  – площа поперечного перерізу труби;  $m$  – маса води, яка поступально рухається у водогоні.

Проте, враховуючи розподіленість рідини по трубопроводу, третьою складовою, яка визначає еквівалентний фіктивний момент інерції рідини, що рухається поступально, з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна знехтувати.

Структурна схема асинхронного двигуна, що побудована за рівняннями (2.1) – (2.10), зображена на рис. 2.3.

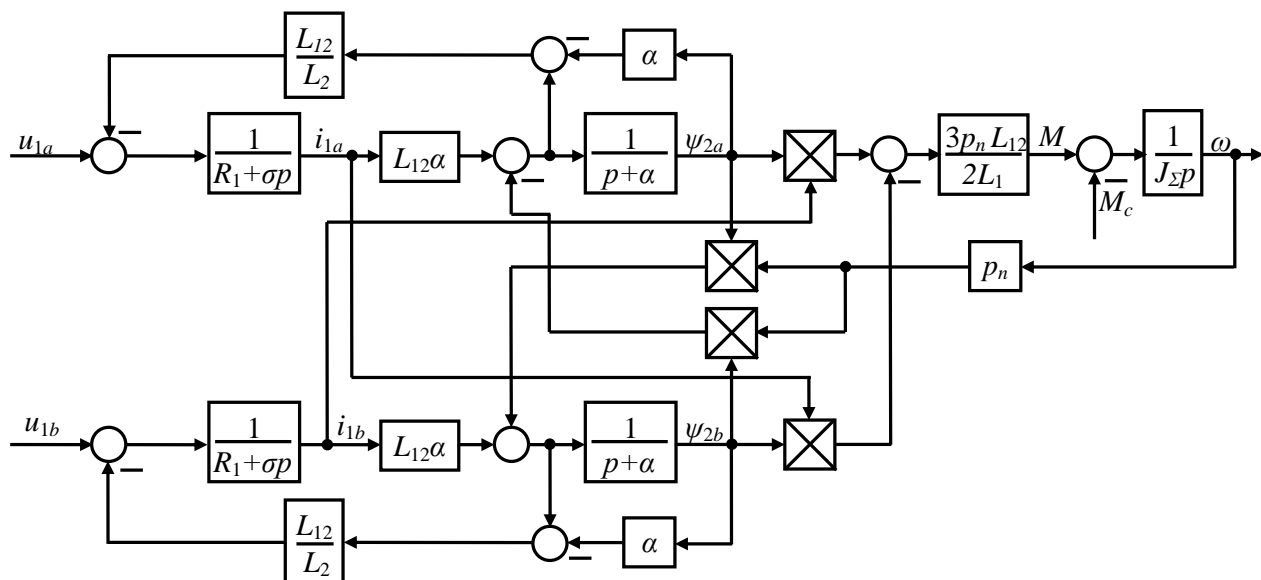


Рис. 2.3. Структурна схема асинхронного двигуна

Перетворювач частоти описується наступною системою рівнянь

$$u_{1a} = u_m \cos \Theta, \quad (2.12)$$

$$u_{1b} = u_m \sin \Theta, \quad (2.13)$$

$$\Theta = 2\pi \int_0^t f dt, \quad (2.14)$$

$$u_m^* = u_0 + (u_{mn} - u_0)(f^*)^2 / f_n^2, \quad (2.15)$$

де  $u_m$  – амплітудне значення напруги;  $\Theta$  – електричний кут;  $u_m^*$  – напруга завдання по амплітуді;  $f$  – частота напруги статора;  $f^*$  – частота завдання;  $u_0$  – напруга зміщення,  $f_n$  – номінальна частота мережі.

Сигнали частоти та амплітуди повинні обмежуватися на рівні 50 Гц та 310 В відповідно. Інерційність каналів частоти та амплітуди моделюється аперіодичними ланками з малими сталими часу  $T_{\mu 1}$ ,  $T_{\mu 2}$

$$f = \frac{1}{T_{\mu 1}p + 1} f^*, \quad (2.16)$$

$$u_m = \frac{1}{T_{\mu 2}p + 1} u_m^*. \quad (2.17)$$

Структурна схема, що реалізує частотний закон керування  $u/f^2$  показана на рис. 2.4.

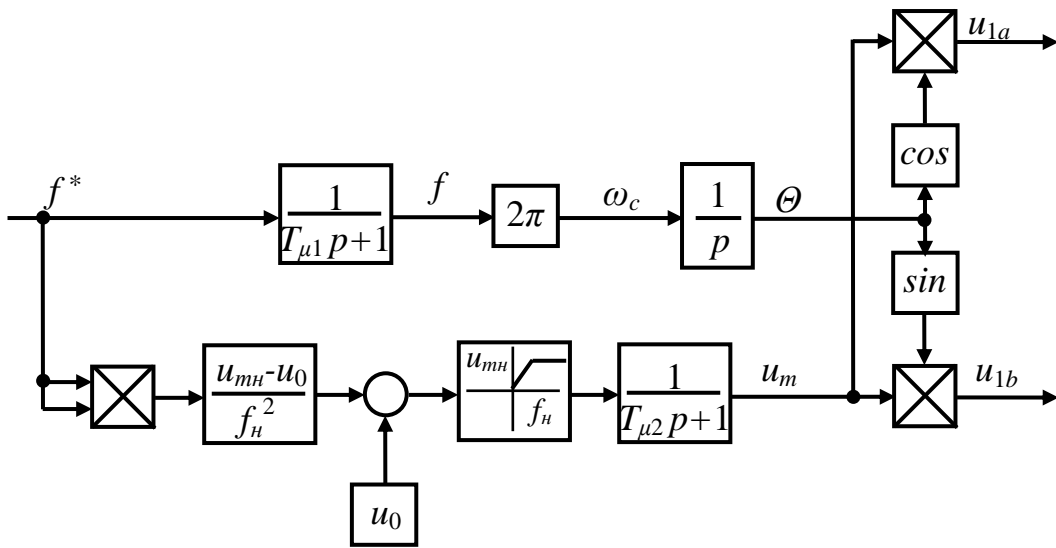


Рис. 2.4. Структурна схема перетворювача частоти

Коефіцієнти зворотних зв'язків на структурній схемі на рис. 1.5 розраховуються наступним чином

$$K_{ззQ} = \frac{U_{зQ\max}}{Q_{\max}}. \quad (2.18)$$

$$K_{ззH} = \frac{U_{зH\max}}{H_{\max}}. \quad (2.19)$$

Коефіцієнти передачі пропорційної  $k_n$ , інтегральної  $k_i$  та диференціальної  $k_d$  частин ПД-регулятора вибираються в залежності від вимог до статичних і динамічних характеристик.

$$W_{\text{рег}}(p) = k_n + k_i \frac{1}{p} + k_d p. \quad (2.20)$$

Якщо не враховувати інерційності перетворювача частоти і електромагнітних кіл двигуна, вважаючи, що вони на порядок нижчі, ніж стала часу технологічного об'єкту, і зв'язок об'єкту та електроприводу через  $M_c$ , вважаючи, що жорсткість механічної характеристики двигуна є достатньо високою, то структурну схему у випадку керування  $Q$  без  $H_{cm}$  можливо

лінеаризувати в околі номінальної точки і спростити до вигляду, що зображена на рис. 2.5.

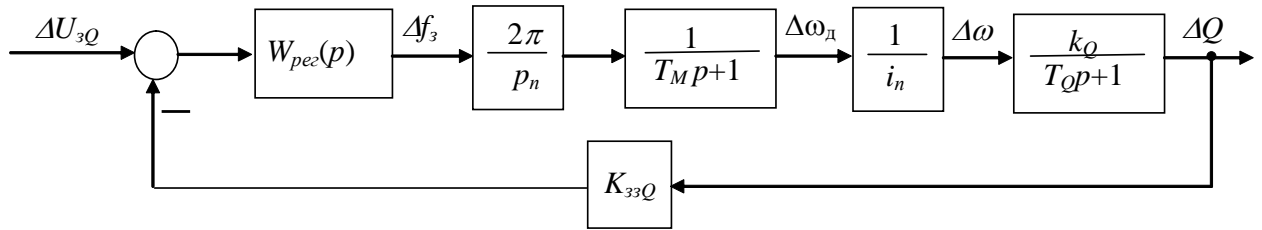


Рис. 2.5. Структурна схема системи керування продуктивністю

Механічна стала двигуна розраховується за формулою

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}. \quad (2.21)$$

Модуль жорсткості робочої ділянки механічної характеристики двигуна визначається як

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 s_k}, \quad (2.22)$$

де  $\omega_0$  – синхронна швидкість обертання;  $s_k$  – критичне ковзання;  $M_k$  – критичний момент.

Коефіцієнт передачі об'єкту по продуктивності

$$k_Q = \frac{H_{0H}}{(a + a_H)\omega_H Q_H}. \quad (2.23)$$

Стала часу об'єкту при регулюванні продуктивності

$$T_Q = \frac{\chi}{2(a + a_H)Q_H}. \quad (2.24)$$

Тоді, при налаштуванні контуру на модульний оптимум отримують ПІ-регулятор продуктивності

$$W_{PI}(p) = k_n + k_i \frac{1}{p}. \quad (2.25)$$

де

$$k_n = \frac{p_n i_n T_Q}{4T_M \pi k_Q k_{TP}}; \quad (2.26)$$

$$k_i = \frac{p_n i_n}{4T_M \pi k_Q k_{тп}}. \quad (2.27)$$

Отримані значення  $k_n$  і  $k_i$  уточнюються при моделюванні структурної схеми рис. 2.1.

У випадку регулювання Н спрощена лінеаризована модель системи керування наступна (рис. 2.6).

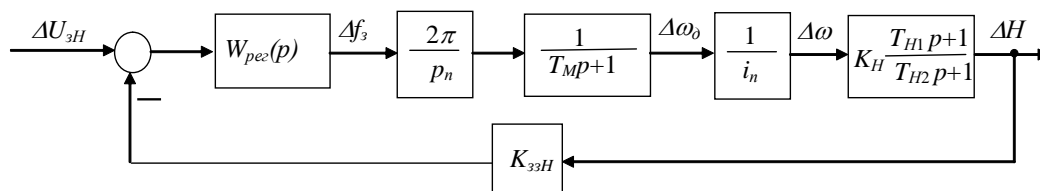


Рис.2.6. Структурна схема системи керування напором

Коефіцієнт передачі об'єкту по напору

$$k_H = \frac{2aH_{0H}}{(a_H + a)\omega_H}. \quad (2.28)$$

Сталі часу об'єкту при регулювання напору

$$T_{H1} = \frac{T_H}{2aQ_H}; \quad (2.29)$$

$$T_{H2} = \frac{T_H}{2(a_H + a)Q_H}. \quad (2.30)$$

При настроюванні контуру на модульний оптимум отримують послідовне з'єднання ІІІ-регулятора та аперіодичного фільтра

$$W(p) = k_p \frac{1}{p} \frac{T_{H2}p + 1}{T_{H1}p + 1}. \quad (2.31)$$

де

$$k_p = \frac{p_n i_n}{4\pi k_H k_{тп} T_M}. \quad (2.32)$$

Застосування ІІІ-регуляторів в вище розглянутих системах забезпечує відсутність статичних помилок по продуктивності чи напору насосної установки.

## 2.2. Програма роботи

1. Реалізувати замкнену за тиском систему керування. Прийняти  $u/f^2 = \text{const}$ . Зняти статичні характеристики системи керування для двох величин завдання:

1.1. Для двох значень П-регулятора тиску;

1.2. Для двох варіантів ПІ-регулятора тиску.

2. Розрахувати та побудувати експериментально зняті характеристики.

3. Скласти модель замкненої системи керування з П та ПІ-регуляторами напорів при частотному керуванні  $u/f^2 = \text{const}$  у пакеті MatLab/Simulink та отримати методом математичного моделювання перехідні процеси швидкості насоса  $\omega = f(t)$ , моменту навантаження  $M_c = f(t)$ , гідравлічного опору  $a = f(t)$ , напорів  $H = f(t)$  та продуктивності  $Q = f(t)$  при зміні стрибками гідравлічного опору мережі на 5%-20% від номінального в обидві сторони.

4. Оформити звіт і зробити висновки по роботі.

## 2.3. Методичні вказівки до виконання роботи

Схема функціональна лабораторної установки зображена на рис. 1.5. Для виконання пункту 1 програми необхідно провести налаштування перетворювача частоти, як у п.1 та 2 методичних вказівок лабораторної роботи №1. Перемкнути S3 у положення, що відповідає замкненій системі. Додатково необхідно реалізувати регулятор напорів, встановивши наступні параметри перетворювача частоти:

– **S0072=0** – відсутня диференціальна складова регулятора;

– **S0074=100%** – вплив регулятора (коефіцієнт підсилення 1);

– **S0145=0** – сигнал завдання напорів поступає в регулятор з блоку формування завдання;

- **C0230=0%** – нижня границя вихідного сигналу регулятора в процентах від C0011;
- **C0231=100%** – верхня границя вихідного сигналу регулятора в процентах від C0011;
- **C0238=0** – вихідний сигнал регулятора подається в блок керування двигуном;
- **C0240=0** – прямий вихід регулятора;
- **C0412/5=4** – сигнал зворотного зв'язку поступає в регулятор з аналогового входу 2I;
- **C0413/2=0** – зміщення сигналу зворотного зв'язку відсутнє;
- **C0414/2=100%** – коефіцієнт підсилення сигналу зворотного зв'язку дорівнює 1.

Оскільки діапазон зміни вихідного сигналу струму датчика тиску 4-8 мА для технологічних умов даної насосної установки, а вхід 2I розраховано на 4-20 мА, то при високих величинах завдання на вході 1и вихід регулятора буде завжди попадати в зону обмежень. Якщо регулятор потрапить у зону обмежень, для забезпечення працездатності необхідно відкалібрувати сигнал завдання, встановивши **C0414=30%**.

Варіанти завдань у відповідності до номерів бригад представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Варіанти завдань

	Бригада 1	Бригада 2	Бригада 3	Бригада 4
Завдання 1	6 мА	6,2 мА	6,4 мА	6,6 мА
Завдання 2	5 мА	5,2 мА	5,4 мА	5,6 мА
Коефіцієнт підсилення П-регулятора	C0070=2	C0070=2,4	C0070=2,6	C0070=2,8
	C0070=3	C0070=3,4	C0070=3,8	C0070=4
Стала часу інтегральної частини	C0071=100	C0071=120	C0071=140	C0071=160
	C0071=200	C0071=220	C0071=240	C0071=260

Статичні характеристики системи стабілізації тиску представляють собою залежність  $H = f(Q)$  в умовах зміни гідравлічного опору мережі (положення вентиля). Для зняття характеристик необхідно зробити наступне:

- виставити кран у середнє положення;
- змінювати завдання потенціометром R1, виставити на міліамперметрі величину завдання тиску (1 або 2) з таблиці 2.1;
- якщо це неможливо зробити і при цьому частота складає 50 Гц, то необхідно ще більше прикрити вентиль;
- після цього ручка потенціометра залишається у незмінному положенні (величина завдання не змінюється);
- вимірюються величини Q і Н для 5-8 робочих точок при зміні положення вентиля.

Під час експерименту необхідно слідкувати, щоб вихід регулятора не заходив у зону обмеження (частота постійно складає 50 Гц).

Дані записуються у таблицю 2.2 для кожного з дослідів.

Таблиця 2.2. Експериментальні дані.

№ п.п.	$I_{PA1}$ , mA	Q, л/с	$I_{PA2}$ , mA	$t_3$ , с	f, Гц

Розраховані дані необхідно записати до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Розрахункові дані.

№ п.п.	H, м	Q, м <sup>3</sup> /ГОД	$Q_{PA2}$ , м <sup>3</sup> /ГОД

Залежність  $H = f(Q)$  при П-регуляторі напору повинна бути паралельна осі Q (рис. 4), тобто покази міліамперметра не повинні змінюватися. При П-регуляторі – з'являється статична помилка і ці покази змінюються.

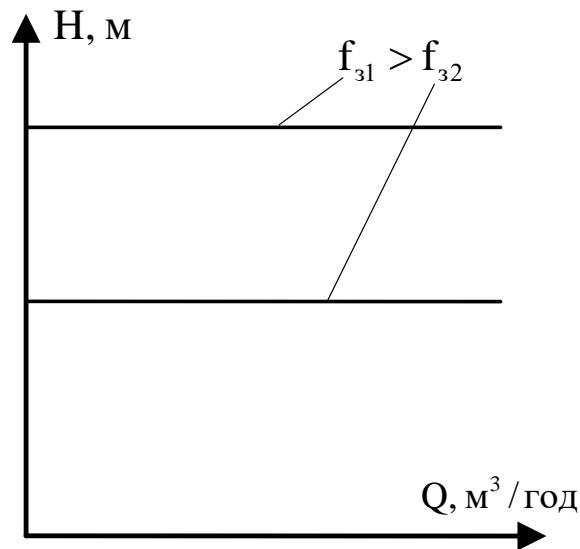


Рисунок 2.7. Статичні характеристики системи при ПІ-регуляторі напору

2. Для дослідження перехідних процесів системи методом математичного моделювання необхідно розрахувати параметри структурної схеми (рис. 2.1) та скласти її у середовищі Matlab/Simulink. Номінальний гідравлічний опір мережі прийняти  $0,22 \text{ м}/(\text{м}^6 \cdot \text{год}^2)$ . Послідовно, через кожні 2 секунди, змінювати опір мережі на значення  $\Delta a_n$ , вказані у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Значення гідравлічного опору мережі.

$\Delta a_n, \text{ м}/(\text{м}^6 / \text{год}^2)$	Бригада 1	Бригада 2	Бригада 3	Бригада 4
$a_1$	0,21	0,24	0,19	0,21
$a_2$	0,22	0,2	0,18	0,22
$a_3$	0,23	0,19	0,21	0,19
$a_4$	0,24	0,18	0,21	0,18
$a_5$	0,2	0,21	0,22	0,23
$a_6$	0,19	0,22	0,23	0,24
$a_7$	0,18	0,23	0,24	0,2

### 2.3. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

1. Титульний аркуш.

2. Програма роботи.
3. Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
4. Таблиці зі знятими експериментальними даними.
5. Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
6. Побудовані статичні характеристики.
7. Розраховані параметри динамічної моделі системи керування тиском.
8. Структурні схеми, побудовані у MatLab/Simulink.
9. Графіки перехідних процесів.
10. Висновки по виконанню лабораторної роботи.

#### **2.4. Контрольні запитання**

1. Наведіть методику синтезу регулятора напору (тиску).
2. Наведіть методику синтезу регулятора продуктивності.
3. Як математично описується насосна установка?
4. Наведіть структурну схему насосної установки.
5. Наведіть структурну схему перетворювача частоти. Поясніть як реалізований закон керування  $u/f^2$ .
6. Як експериментально зняти напірні характеристики насосної установки у замкненому за тиском стані при частотному та векторному керуванні?
7. Як експериментально зняти характеристики ККД насосної установки у замкненому за тиском стані при частотному та векторному керуванні?

## Лабораторна робота №3

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

**Мета роботи** – порівняльне дослідження енергетичної ефективності вентиляторної установки при регулюванні продуктивності вентиляційної системи зміною аеродинамічного опору повітропроводу та за допомогою зміни швидкості приводного двигуна.

### 3.1. Основні теоретичні відомості

Вентилятори використовуються для переміщення повітря, або інших газів, від джерел забору по системі повітропроводів у приміщення або до технологічного процесу. Переміщення повітря здійснюється за рахунок різниці тисків на вході та виході вентилятора. Кожен вентилятор має подолати опір вентиляційної мережі, який визначається геометричною конфігурацією повітропроводів та іншими вентиляційним обладнанням. Цей опір викликає перепад тиску, що призводить до зменшення швидкості повітряного потоку на виході повітропроводу у порівнянні із швидкістю на вході.

Опір повітропроводу може бути також регульованим за допомогою різноманітних засувок, наприклад як показано на рис. 3.1.

Традиційним способом регулювання параметрів швидкості повітряного потоку у вентиляторних установках є дроселювання напірних ліній, тобто зміна опору вентиляційної мережі за рахунок зміни положення засувки.

З приведеного аналізу неважко провести аналогію між вентиляційною системою та електричним колом. Якщо представити вентилятор з напором  $H$  – як джерело ЕРС, продуктивністю – як електричний струм, повітропровід – як електричний провідник з опором  $R_1$ , засувку – як потенціометр  $R$ , споживач повітря – опір навантаження  $R_H$ , то вентиляційна система може бути представлена аналогом у вигляді електричного кола, показано на рис. 3.2.

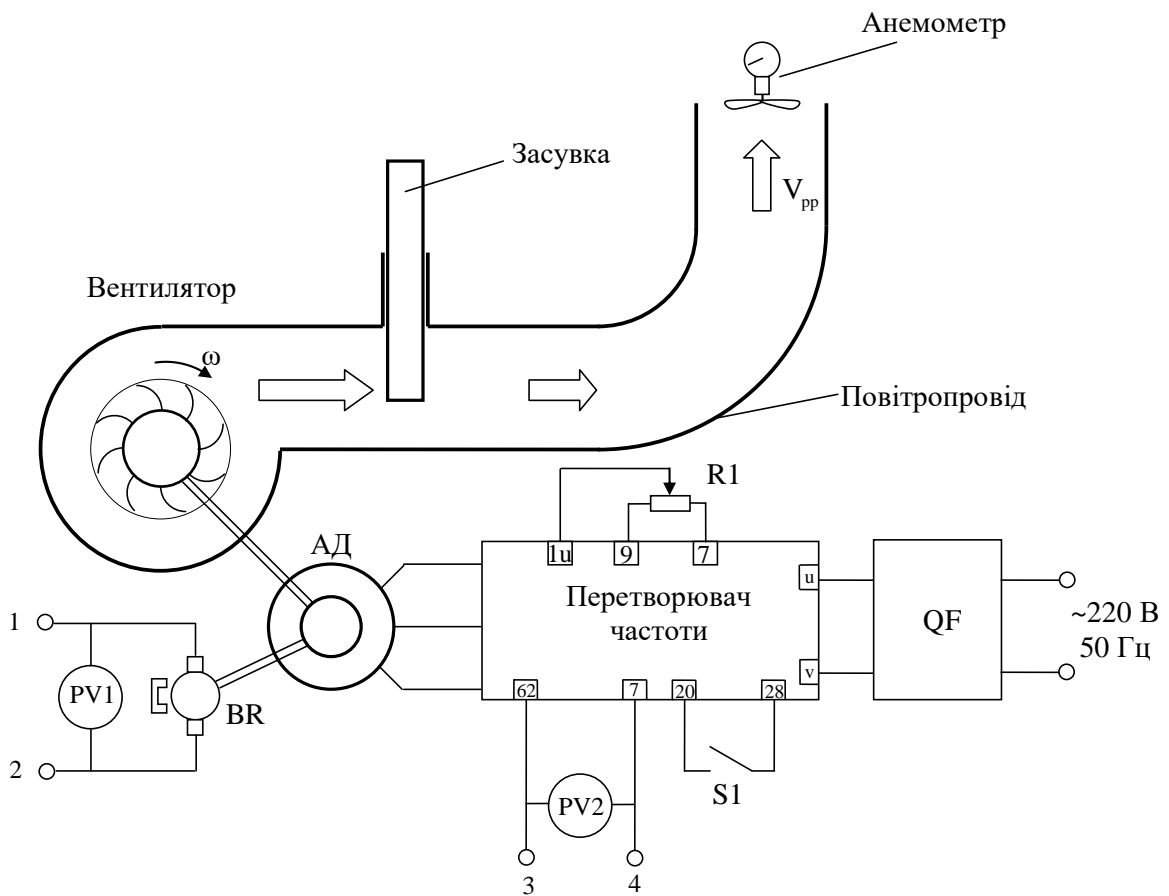


Рис. 3.1. Функціональна схема лабораторного стенду

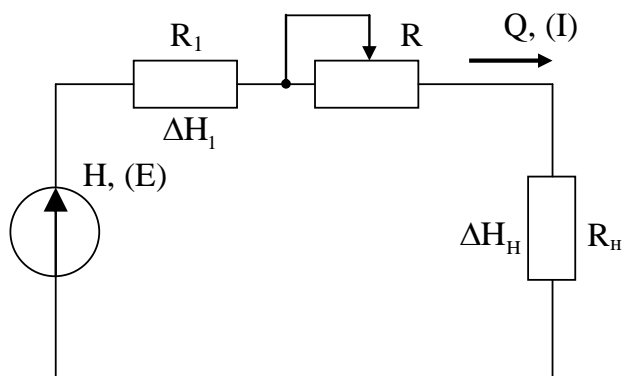


Рис. 3.2. Електричний аналог вентиляційної системи

З розгляду рис. 3.2, можна встановити, що величину струму в навантаженні (еквівалент швидкості повітропоток) можна регулювати за допомогою змінного опору  $R$ . У цьому випадку втрати потужності для електричного кола виражаються як  $\Delta P = I^2(R + R_1)$ .

Втрати потужності при регулюванні струму в навантаженні можна зменшити, якщо використати регульоване джерело напруги, як показано на рис. 3.3. В цьому випадку  $\Delta P = I^2 R_1$ , тобто додаткові втрати які вносяться за рахунок збільшення опору мережі відсутні.

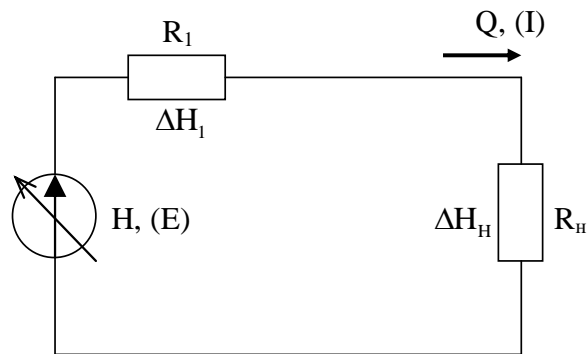


Рис. 3.3. Електричний аналог вентиляційної системи

Проводячи зворотну аналогію електричного кола з вентиляційною системою можна зробити висновок, що енергетична ефективність при регулюванні повітряного потоку за допомогою засувки буде нижчою, ніж при регулюванні продуктивності вентиляційної системи за допомогою зміни швидкості приводного двигуна.

Для дослідження енергетичної ефективності розглянутих методів регулювання швидкості повітряного потоку використовується лабораторний стенд, функціональна схема якого показана на рис. 3.1.

Методика дослідження полягає у наступному. Необхідно порівняти споживану двигуном активну потужність при створенні однієї і тієї ж продуктивності за допомогою зміни положення засувки та за допомогою регулювання швидкості приводного двигуна.

Розглянемо характеристики вентилятора та повітропроводу, зображені на рис. 3.4. Нехай характеристика 1 відповідає вентилятору який працює з

номінальною швидкістю. Якщо засувка вентилятора повністю закрита, то робоча точка вентилятора знаходиться у точці «а». За рахунок зменшення аеродинамічного опору труби, тобто формуючи відповідні характеристики повітропроводу, робоча точка (перетин характеристики вентилятора та повітропроводу) буде пересуватися по характеристиці вентилятора до точки «с».

Виходячи з наведених характеристик, величина заданої продуктивності вентиляційної системи  $Q^*$  може бути досягнута двома шляхами:

1. За рахунок формування характеристики повітропроводу такої, щоб точка її перетину з номінальною характеристикою вентилятора знаходилася у точці «b»;

2. За рахунок зменшення швидкості вентилятора і формування його штучної характеристики 2 так, щоб при повністю відкритій засувці отримати необхідне значення  $Q^*$ .

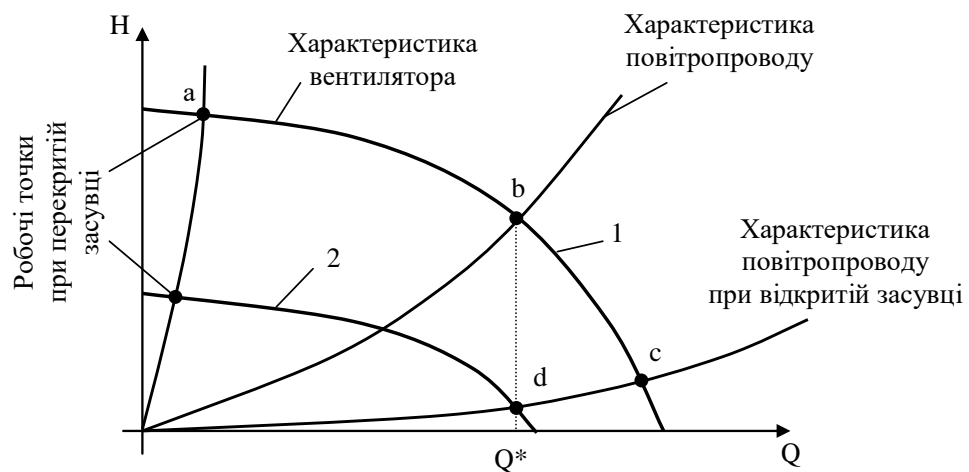


Рис. 3.4. Характеристики вентиляторної установки

Потужність на валу двигуна вентилятора визначається

$$P = \frac{QH}{\eta_B}, \quad (3.1)$$

де  $\eta_B$  – ККД вентилятора;  $H$  – тиск в  $[Н/м^2]$ ;  $Q$  – витрати в  $[м^3/с]$ .

З формули 3.1 та рис. 3.4 неважко встановити, що при регулюванні витрат  $Q$  за допомогою зміни кутової швидкості потужність на валу двигуна буде меншою, чим при регулюванні за допомогою засувки.

### 3.2. Програма роботи

1. Ознайомитися з лабораторним стендом, приладами контролю та керування.

2. Включити стенд, повернути настройки перетворювача частоти до заводських установок. Виконати базову настройку перетворювача частоти, провести ідентифікацію параметрів двигуна. Налаштувати перетворювач частоти на алгоритм керування асинхронним двигуном  $u/f = \text{const}$ .

3. Повністю відкрити засувку вентилятора і запустити приводний двигун вентилятора на номінальну швидкість.

4. Виміряти швидкість повітряного потоку вентилятора на виході повітропроводу при повністю відкритій засувці –  $V_{pp100\%}$ , та потужність що споживає двигун.

5. Зменшуючи переріз повітропроводу за допомогою засувки отримати на його виході значення швидкості повітропотoku що становлять 25, 50, 75 % від значення  $V_{pp100\%}$ , отриманого в п.4. Для кожного значення швидкості повітряного потоку виміряти активну потужність що споживає двигун. Дані записати до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Експериментальні дані до п. 5.

Регулювання $V_{pp}$ засувкою			Регулювання $V_{pp}$ за рахунок $\omega_{дв}$		
Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	$U_{PV2}$ , В	Р, Вт	Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	$U_{PV2}$ , В	Р, Вт
$V_{pp100\%}$					
$V_{pp75\%}$					
$V_{pp50\%}$					
$V_{pp25\%}$					

6. Повністю відкрити засувку вентилятора. Змінюючи швидкість двигуна добитися на виході повітропроводу тих самих значень швидкості повітряного потоку, що і в пункті 5. Для кожного значення виміряти активну потужність, яку споживає двигун.

7. Порівняти активну потужність, що споживає двигун при двох способах керування у п.5 та п.6 та зробити висновки щодо енергетичної ефективності способів керування вентиляційною установкою.

8. Запустити двигун на номінальну швидкість. Зняти залежність споживаної активної потужності від швидкості повітряного потоку при його регулюванні методом пересування засувки. Дані занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Експериментальні дані до п. 8.

№	Положення засувки	Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	$U_{PV2}$ , В	Р, Вт
1.	10			
2.	9			
3.	8			
4.	7			
5.	6			
6.	5			
7.	4			
8.	3			
9.	2			
10.	1			
11.	0			

9. Зняти залежність споживаної активної потужності від швидкості повітряного потоку при його регулюванні за допомогою зміни швидкості двигуна при лінійній характеристиці частотного керування ( $u/f = \text{const}$ ) та залежність напруги від частоти. Дані занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Експериментальні дані до п. 9.

№	Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	$U_{PV2}$ , В	Р, Вт	Напруга статора, В	Частота напруги статора, Гц
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

10.Налаштувати перетворювач частоти на алгоритм з квадратичною характеристикою частотного керування асинхронним двигуном  $u/f^2 = \text{const}$  та повторити досліди пункту 9. Дані занести до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Експериментальні дані до п. 10.

№	Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	$U_{PV2}$ , В	Р, Вт	Напруга статора, В	Частота напруги статора, Гц
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

11.Налаштувати перетворювач частоти на бездатчикове векторне керування. Зняти залежність споживаної активної потужності від швидкості повітряного потоку та залежність напруги від частоти. Дані занести до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Експериментальні дані до п. 11.

№	Швидкість повітряного потоку, $V_{pp}$ , м/с	Потужність		Напруга статора, В	Частота напруги статора, Гц
		$U_{PV2}$ , В	Р, Вт		
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					

12. Порівняти отримані характеристики при частотному та векторному керуванні, зробити висновки.

13. Написати програму у середовищі MatLab для обробки знятих даних та побудови графіків залежностей  $V = f(P)$ ,  $V = f(U_1)$  та  $U_1 = f(f)$ .

14. Оформити отримані результати та зробити висновки по роботі.

### 3.3. Опис лабораторної установки

Функціональна схема лабораторної установки зображена на рис. 3.1. Стенд складається з панелі керування та вентиляційної установки. На панелі керування розміщені вольтметри PV1, PV2, автоматичний вимикач QF, потенціометр для регулювання швидкості двигуна R1, тумблер для активації дозволу роботи перетворювача частоти S1 та перетворювач частоти Lenze 8200 Vector. Вентиляційна установка складається з вентилятора з приводним асинхронним двигуном. На виході вентилятора змонтований повітропровід у вигляді прямокутної труби із засувкою для регулювання швидкості повітряного потоку. На валу вентилятора знаходиться тахогенератор, який подає сигнал напруги, пропорційний швидкості обертання на вольтметр PV1.

Для визначення швидкості повітряного потоку на виході трубопроводу використовується цифровий анемометр ST-618.

### 3.4. Методичні вказівки до виконання роботи

1. Переконайтеся, що перемикач S1 знаходиться у нижньому положенні (заборона дозволу роботи перетворювача). Ввімкнути QF1, перетворювач частоти вмикається. Щоб отримати доступ до зміни усіх параметрів необхідно натиснути клавішу «1-2» (перехід у ряд функцій «2») на пульті перетворювача частоти, перейти за допомогою клавіш «↑» та «↓» до напису «User», змінити його на «All» шляхом натиснення клавіші «↑» та зберегти, натиснувши «Enter». Далі необхідно повернутися у ряд функцій «1», натиснувши клавішу «1-2».

Для встановлення заводських значень параметрів у перетворювачі частоти необхідно:

- вибрати клавішами «←» та «→» меню «Code»;
- вибрати клавішами «↑» та «↓» номер параметра **C0002**;
- перейти за допомогою «→» до зміни величини параметру «Para»;
- встановити за допомогою «↑» та «↓» величину «1»;
- натиснути «Enter»;
- вийти з режиму, натиснувши клавішу «←».

Ідентифікація параметрів асинхронного двигуна можлива лише в режимі векторного керування, тому по методиці, яка описана вище, потрібно:

- перевірити, що перемикач S1 знаходиться у нижньому положенні;
- встановити параметр **C0014=4** – векторне керування;
- ввести паспортні дані двигуна:  $\omega_n \rightarrow \mathbf{C0087}$ ;  $I_n \rightarrow \mathbf{C0088}$ ;  $f_n \rightarrow \mathbf{C0089}$ ;  
 $u_n \rightarrow \mathbf{C0090}$ ;  $\cos\phi \rightarrow \mathbf{C0091}$  (при виборі напруги з паспортних даних двигуна треба мати на увазі, що обмотки двигуна з'єднані у трикутник, тобто  $u_n = 220\text{В}$ );

- встановити параметр **C0148=1** (активація ідентифікаційного прогону) і натиснути «Enter»;
- натиснути кнопку Run та переключити перемикач S1 угору (дозволити роботу перетворювача);
- ідентифікація параметрів двигуна проходить приблизно 30 секунд, по завершенню з'явиться напис «IMP»;
- зняти дозвіл роботи (S1 униз).

2. Для налаштування параметрів перетворювача частоти на частотне керування  $u/f^2 = \text{const}$ , або  $u/f = \text{const}$  необхідно встановити наступні значення параметрів:

- **C0010=0 Гц** – мінімальна вхідна частота;
- **C0011=50 Гц** – максимальна частота 50 Гц;
- **C0012=5 с** – час розгону 5 секунд;
- **C0013=5 с** – час гальмування 5 секунд;
- **C0014=3** – активація частотного керування  $u/f^2 = \text{const}$  (у випадку керування  $u/f = \text{const}$  виставляється C0014=2);
- **C0034/1=0** – аналоговий вхід завдання 0...5 В;
- **C0111=4** – на вольтметр PV2 через аналоговий вихід X3/62 буде виводитися сигнал напруги, що пропорційний активній потужності, що споживає двигун;
- **C0140=0 Гц** – зміщення завдання частоти відсутнє;
- **C0238=2** – завдання частоти надходить в блок керування двигуном, мінуючи регулятор;
- **C0412/1=1** – сигнал завдання частоти поступає з аналогового входу «1u» (згідно заводських налаштувань H/RE=0);
- **C0413/1=0** – зміщення сигналу завдання відсутнє;
- **C0414/1=100%** – коефіцієнт підсилення вхідного сигналу дорівнює 1;

Після того, як внесено усі параметри, необхідно дати дозвіл роботи перетворювача частоти (перемикач S1 угору). Натиснути кнопку «Run» і за допомогою потенціометра виставити необхідну вихідну частоту.

3. Перетворювач частоти має аналоговий вихід, на який можна виводити сигнал напруги, пропорційний активній потужності, що споживається двигуном. Ця напруга фіксується вольтметром PV2. Номінальній потужності двигуна відповідає 3 вольти цієї напруги. Тому при перерахунку потужності зручно скористатися пропорцією

$$\frac{P_n}{P_x} = \frac{3}{U_{PV2}}, \quad (3.2)$$

звідки

$$P_x = \frac{P_n \cdot U_{PV2}}{3}, \quad (3.3)$$

де  $P_x$  – значення потужності для конкретної робочої точки;  $P_n$  – номінальна потужність двигуна вентиляційної установки;  $U_{PV2}$  – покази відповідного вольтметра.

4. Для вимірювання швидкості повітряного потоку за допомогою анемометра необхідно:

- ввімкнути прилад, натиснувши кнопку «auto power off»;
- вибрати одиницю виміру м/с, натиснувши кнопку «m/s»;
- визначити напрям проходження повітряного потоку;
- тримати анемометр так, щоб потік повітря проходив через крильчатку в напрямі, вказаному на ній;
- тримати прилад паралельно напрямку вітру біля 4 секунд для стабілізації показів;
- **при вимірювання швидкості повітряного потоку у режимі пересування засувки, потрібно для кожного її положення притримувати засувку від коливань для збільшення точності вимірювання;**
- натиснути «hold» для зберігання показів приладу;

– для зняття наступної точки знову натиснути кнопку «hold» та повторити попередні дії;

– по закінченню вимірів натиснути кнопку «auto power off».

5. Індикація напруги статора виводиться у параметр **C0052**, а частоти двигуна у параметр **C0050**.

6. Паспортні дані обладнання.

**Паспортні дані вентилятора:**

- модель Air Blower DE190;
- максимальна продуктивність 2100 м<sup>3</sup>/год;
- максимальний тиск 780 Па;
- номінальна частота обертання 2800 об/хв.;
- номінальна потужність 0,75 кВт.

**Паспортні дані двигуна:**

- модель YS8012;
- номінальна потужність 0,75 кВт;
- номінальна напруга 380/220 В;
- номінальний струм 1,76/3,04 А;
- номінальна частота обертання 2800 об/хв;
- номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) 76,5%;
- номінальний коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) 0,85.

**Паспортні дані перетворювача частоти:**

- модель Lenze 8200 Vector;
- потужність 0,75 кВт.

**Паспортні дані анемометра:**

- модель ST-618;
- діапазон зміни швидкості повітряного потоку 0,0...45,0 м/с;
- похибка вимірювання 3%.

### 3.5. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

1. Титульний аркуш.
2. Програма роботи.
3. Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
4. Таблиці зі знятими експериментальними даними.
5. Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
6. Побудовані графіки та характеристики.
7. Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

### 3.6. Контрольні запитання

1. Наведіть основні способи регулювання повітряного потоку у вентиляційних установках. Їх переваги та недоліки.
2. Наведіть схему електричну, що є аналогом вентиляційної системи.
3. Як провести ідентифікацію параметрів асинхронного двигуна у режимі векторного керування?
4. Як налаштувати перетворювач частоти на алгоритм керування  $u/f$  ?
5. Опишіть методику зняття характеристик при керуванні методом засувки.
6. Опишіть методику зняття характеристик при керуванні методом зміни швидкості двигуна.
7. Поясніть на Q-N характеристиках принцип регулювання продуктивності за допомогою засувки та шляхом зміни швидкості обертання привідного двигуна.

## Лабораторна робота № 4

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МАКЕТУ ЛІФТОВОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

**Мета роботи** – ознайомлення з устаткуванням, кінематичними схемами ліфтових підйомних установок (ЛПУ). Дослідження статичних і динамічних процесів, що протікають в електроприводі ЛПУ. Вивчення методики вибору електродвигуна. Вивчення різних варіантів схем керування електроприводом ЛПУ.

### 4.1. Основні теоретичні відомості

Класифікація, призначення, основні види ліфтових підйомних установок.

Ліфтом називається стаціонарний підйомний механізм, призначений для вертикального транспортування людей або вантажу з одного поверху на іншій у кабіні (на платформі), що переміщається по нерухомих напрямних в обгородженій з усіх боків шахті. Все встаткування ліфта розміщується в шахті і у машинному відділенні. Кабіна і шахта обладнані дверима, що запираються. Ліфт приводиться в дію від лебідки з електродвигуном.

Залежно від призначення ліфти діляться на наступні групи:

- пасажирські вантажопідйомністю 350...1000 кг, призначені для підйому і спуску людей з ручним багажем; у деяких випадках дозволяється підйом і спуск речей домашнього побуту;
- лікарняні вантажопідйомністю до 500 кг, призначені для підйому і спуску хворого на ліжку;
- вантажні вантажопідйомністю 500...5000 кг, призначені винятково для

підйому і спуску вантажів;

- маленькі вантажні, призначені для підйому і спуску невеликих вантажів вагою до 160 кг.

Пасажирські і вантажні ліфти залежно від швидкості руху підрозділяються на тихохідні, нормальні і швидкохідні (швидкісні). До тихохідних відносяться всі види ліфтів зі швидкістю до 0,5 м/с. Швидкість руху кабін нормальних ліфтів перебуває у межах від 0,75 м/с до 1,5 м/с. Нормальні ліфти обслуговують будинки висотою 6 - 12 поверхів. Швидкохідні ліфти використовуються в багатоповерхових будинках (16 і більше поверхів) і рухаються зі швидкістю 2,5 - 3,5 м/с. У деяких випадках (при відносно великих відстанях між зупинками) швидкість ліфта може бути збільшена до 5 м/с. Для обслуговування висотних будинків застосовуються ліфти зі швидкістю руху 5 м/с. Маленькі вантажні ліфти найчастіше використовуються в бібліотеках для подачі книг із книгосховища або в їдальнях для підйому продуктів і мають тихохідне виконання.

#### Елементи конструкції ЛПУ.

У більшості кінематичних схем ЛПУ основними вузлами є (рис. 4.1.): електродвигун 1, підйомна лебідка 2, кабіна 3, противага 4, механічне гальмо, канати і апаратура керування. Підйомний механізм приводиться в дію електродвигуном безпосередньо або через редуктор, пов'язаний із двигуном муфтою. У першому випадку канатоведучий шків 5, на який навішується кабіна, закріплюється на валу двигуна (безредукторний привод), у другому випадку - встановлюється на вихідному валу редуктора (редукторний привод).

Загальний вигляд ліфтової підйомної установки показаний на рис.1.1, де позначені: двері шахти 6; кабіна ліфта 3; напрямні кабінні 7 та противаги 8. Кабіна і противага підвішуються до шківів на сталевих тягових канатах. Направні втримують кабінку в строго вертикальному положенні. У

надшахтному машинному приміщенні, крім підйомної лебідки 9, розміщені: шафа (панель) керування 10; обмежувач швидкості 11 та інша апаратура.

Кабіни ліфтів всіх призначень мають запобіжні пристрої (вловлювачі), які забезпечують зупинку кабіни при обриві або ослабленні несучих канатів, а також при збільшенні швидкості руху вище 25-40% від номінальної. Пристрій обмеження швидкості 11 являє собою відцентрове реле, пов'язане з вловлювачами тросом. При перевищенні припустимих значень швидкості відцентрове реле спрацьовує, що веде до призупинки переміщення допоміжного тросу і спрацьовування вловлювачів, які заклинюють кабіну між напрямними.

Розсувні двері кабіни і шахти відкриваються автоматично, за допомогою привода дверей, встановленого на даху кабіни.

Електроустаткування кабіни пов'язане з машинним приміщенням гнучким кабелем. По всій висоті шахти на поверхових площадках встановлені шахтні двері. У нижній частині шахти (прямку) розташовані гідравлічні буфери кабіни і противаги, натяжні пристрої канатів.

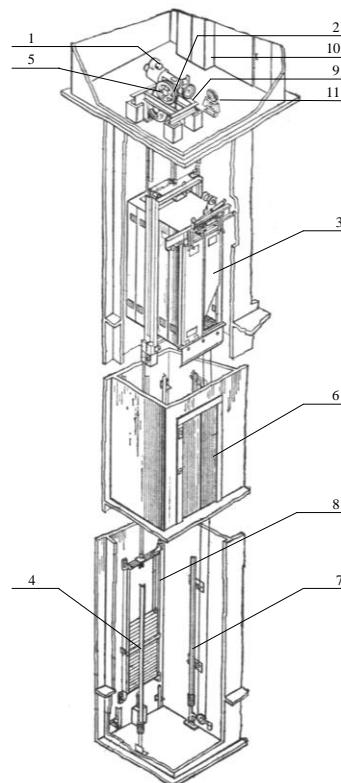


Рис. 4.1. Будова шахти і машинного приміщення пасажирського ліфта

### Кінематичні схеми ліфтових установок.

Кінематична схема ЛПУ, розташування двигуна, наявність противаги і її розташування визначаються будівельними особливостями будинків і спеціальними вимогами до ліфтів.

За кінематичною схемою ліфти розрізняються на врівноважені і неврівноважені, з верхнім і нижнім розташуванням електропривода (див. рис. 4.2). Неврівноважені ЛПУ (які не мають противаги) вимагають застосування електродвигунів підвищеної потужності і тому використовуються рідко, наприклад, при маленькій вантажопідйомності або у випадках, коли встановлення противаги з якоїсь причини неможливо (рис. 4.2, а). У цьому випадку приводний електродвигун може бути встановлений над шахтою (рис. 4.2, а) або внизу на фундаменті. При розрахунку ліфта без противаги потужність привода розраховується на сумарну масу кабіни, троса і вантажу, що піднімається в кабіні.

Найбільш простими і у той же час найбільш раціональними є кінематичні схеми ліфтів із противагами, показані на рис. 4.2, б, в з верхнім розташуванням двигуна.

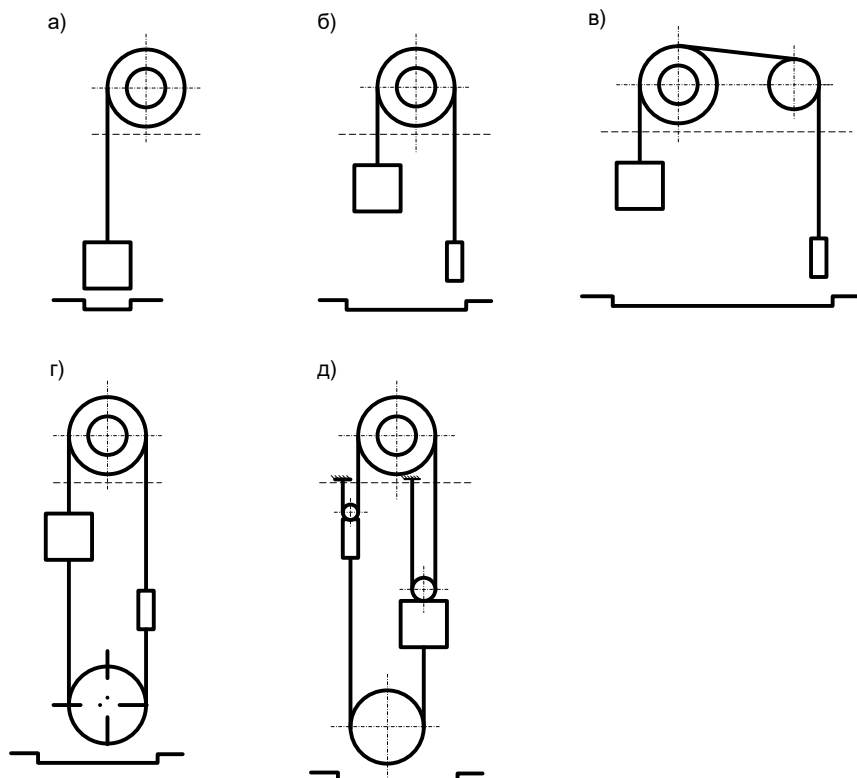


Рис. 4.2. Кінематичні схеми ліфтових установок

У схемі 4.2, б, діаметр канатоведучого шківа лебідки рівняється відстані по горизонталі між точками кріплення несучих канатів, чим досягається найбільший к.к.д. і зменшується довжина і інтенсивність зношування канатів. При необхідності відводу противаги від кабіни використовується відповідний блок (див. рис. 4.2, д), що зменшує кут обхвату на канатоведучому барабані. Для збільшення сили тертя між канатоведучими шківами лебідки і несучих канатів застосовують схеми з подвійним обхватом канатів на шківі.

При обслуговуванні малоповерхових будинків (шість - вісім поверхів) маса несучих канатів становить відносно маленьку величину і несуттєво позначається на роботі привода. При збільшенні висоти підйому до 50 м і вище маса канатів може досягти кількох сотень кілограмів, що буде позначатися на зрівноважуванні кабіни і, як наслідок, на величині потужності двигуна. Для компенсації ваги канатів у ліфтах з більшими висотами підйому використовуються врівноважувальні канати (рис. 4.2, з, д).

В ЛПУ при швидкостях руху кабіни до 1.6 м/с застосовуються редукторні лебідки, які обладнуються двошвидкісним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.

Швидкісні ліфти мають безредукторні лебідки, у яких застосовується регульований електропривод постійного або змінного струму.

#### Системи керування і автоматизації.

У нинішній час ліфти виконуються з високим ступенем автоматизації операцій по відкриванню і закриванню дверей, переміщенню і точній зупинці кабіни, рівнем організації керування.

Всі основні технологічні операції ЛПУ здійснюються за допомогою електроприводів. До сучасних електроприводів ліфтів пред'являються високі вимоги по безпеці і комфортабельності. Система керування повинна здійснювати пуск із заданим прискоренням, підтримувати задану швидкість, здійснювати автоматичне гальмування, а також забезпечувати точну зупинку кабіни на поверсі і сигналізацію про її положення, контролювати

завантаження кабіни і спрацьовування численних блокувань та ін.

Залежно від призначення ЛПУ, розрізняють наступні види організації керування:

- внутрішнє - при якому команда подається лише з кабіни (ліфти деяких торговельних, адміністративних і ін. споруджень);
- зовнішнє - коли керуючий сигнал надходить із завантажувальних пунктів (поверхів);
- змішане - коли команду керування може бути подано як з кабіни, так і від зовнішніх пунктів зупинки (житлові спорудження);
- просте і збірне керування. При простому керуванні виконується лише одна команда. При збірному керуванні може надходити одночасно декілька команд, але виконуються вони послідовно, відповідно до закладеного у схему алгоритму.

Найбільше поширення для привода нормальних пасажирських ліфтів одержали асинхронні двошвидкісні електродвигуни і релейно-контакторні схеми керування. Простота обслуговування і достатня точність зупинки кабіни дозволяють застосовувати такі двигуни на ліфтах багатоповерхових будинків при швидкості руху кабіни 1м/с. Точна зупинка кабіни на поверхах здійснюється переводом двигуна на знижену швидкість руху 0,25 м/с. Перехід на знижену швидкість може здійснюватися за допомогою індуктивних датчиків, поверхових перемикачів або центрального поверхового перемикача, встановленого в машинному приміщенні і пов'язаного з редуктором пластинчастим ланцюгом.

Для збільшення надійності роботи схем автоматичного керування в останні роки все ширше впроваджуються елементи безконтактного керування (логічні елементи, мікропроцесорні пристрої). Найпростіші безконтактні схеми керування можуть бути отримані шляхом заміни контактних апаратів керування логічними елементами різних типів.

### Вимоги до системи електропривода.

В останні роки значно підвищилися вимоги до ліфтів. Пасажирські ліфти повинні забезпечувати: задану продуктивність; повну безпеку пасажирів і перевезених вантажів; високу надійність роботи; підвищений рівень комфорту при транспортуванні людей; енергозбереження під час експлуатації.

Основні вимоги до систем електропривода ЛПУ:

- реверсивність;
- точне позиціонування (у межах  $\pm 50$  мм для ліфтів житлових і адміністративних будинків і  $\pm 10$  мм для лікарняних ліфтів);
- мінімальна тривалість перехідних процесів при заданих величинах прискорення і гальмування (стандартне значення  $2 \text{ м/с}^2$ );
- забезпечення розрахункової швидкості руху;
- безпека і надійність;
- низький рівень шуму.

Для забезпечення безпеки в ЛПУ застосовуються механічні та електричні блокування, різні види захистів. Основні блокування: заборона пуску при недостатній вазі пасажира; заборона пуску з відкритими дверима кабіни та шахти, з відкритими дверима приямка, при відкритому аварійному люку кабіни; заборона пуску при перевантаженні кабіни. Повинні бути забезпечені наступні види захистів: максимально струмовий захист; захист від перегріву; від обриву фаз; захист від перевищення швидкості. При спрацьовуванні будь якого захисту або блокування система керування не виробляє команди на початок роботи. При спрацьовуванні захисту під час роботи, система керування виробляє сигнал на екстрене припинення руху.

Система керування повинна контролювати процес підйому і спуску кабіни, забезпечуючи обрану швидкість руху, а також обмежувати прискорення і ривок при розгоні і гальмуванні. При наближенні до поверху зупинки система повинна знизити швидкість, щоб зменшити навантаження на механічне гальмо і зменшити ривок. При надходженні наказу від кнопок

на поверсі або в кабіні, система керування повинна визначити, з якого поверху надійшов виклик, на якому поверсі перебуває кабіна і, відповідно до отриманих даних, вибрати напрямок руху.

## 4.2. Опис лабораторної установки

### Технічні характеристики і конструкція.

Лабораторний макет ліфтової установки призначений для підйому вантажів загальною масою до 100 кг. Висота підйому становить 3,7 м, що умовно відповідає трьом поверховим площадкам. Швидкість руху кабіни дорівнює 0,6 м/с. Кінематична схема ліфтової установки представлена на рис. 4.3. Кінематична схема відповідає системі підйому із противагою: сталевий тяговий канат охоплює канатоведучий шків, а до кінців канату підвішені кабіна і противага. Електропривод знаходиться у машинному приміщенні, що розташовано на верхньому, умовно технічному поверсі будинку. Система керування ліфтом розміщена в стаціонарних шафах керування. Шахта ліфта має силовий каркас зі сталевих прокатних профілів, обладнана дверима, що закриваються за допомогою привода. У нижній частині шахти встановлені гідравлічні буфери. Кабіна має освітлення, отвори для природної вентиляції.

Кабіна і противага мають вловлювачі, які повинні зупиняти і утримувати її на напрямних. Вловлювачі вмикаються від пристрою обмеження швидкості і спрацьовують, якщо швидкість кабіни перевищує номінальну більш ніж на 15%.

На кожному поверсі на панелях керування розміщені кнопки виклику. Кнопки керування рухом ліфта з кабіни винесені назовні і закріплені на шахті.

Даний макет ліфта оснащений системою керування збірною типу, із зупинками на поверхах по виклику при русі кабіни угору та униз. Інформація про положення кабіни, яка необхідна для системи керування, знімається з

селектора, який встановлено на валу барабану. При проходженні кабіною поверху селектор замикає відповідний контакт.

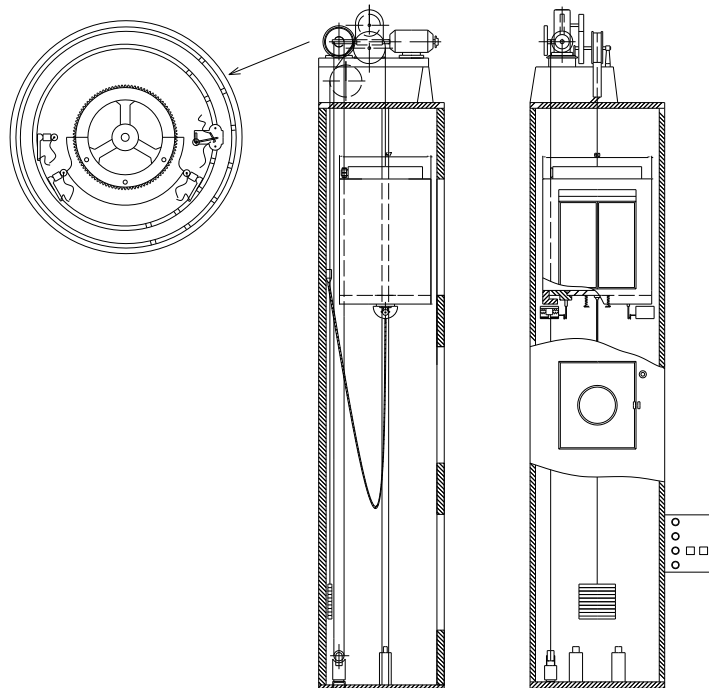


Рис. 4.3. Загальний вид і кінематична схема лабораторного макета ліфтової установки

Основне електроустаткування.

В електроприводі макета підйомної установки застосована комплектна ліфтова лебідка EM-70 фірми "POLYLIFT" (Греція). До складу лебідки входить електродвигун, редуктор, шків, гальмовий пристрій, маховик. Зовнішній вигляд лебідки представлений на рис. 4.4.

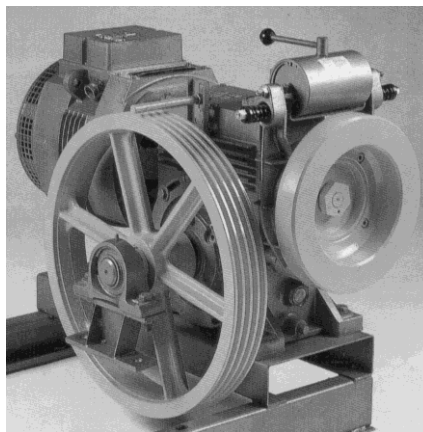


Рис. 4.4. Ліфтова лебідка

Характеристика елементів лебідки:

1. Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором:

- номінальна потужність  $P_n = 4$  кВт;
- синхронна частота обертання  $n_c = 1500$  об/хв.

2. Редуктор

- передаточне відношення  $i_p = 45$ .

3. Шків:

- діаметр  $D_{ш} = 0,4$  м;
- лінійна швидкість на шківі  $v = 0,6$  м/с;

4. Маховик з моментом інерції  $J_m = 0,2$  кг·м<sup>2</sup>.

Система керування електропривода розміщена у шафі керування. Для реалізації частотно-регульованого варіанту електропривода до шафи керування за допомогою штекерних роз'ємів підключається перетворювач частоти ACS 550 Single Drive фірми АВВ.

Схема підключень елементів електропривода представлена на рис. 4.5.

На схемі позначені:

- М – електродвигун підйомної лебідки;
- Х1 – силовий роз'єм з підведеною напругою живлення з боку мережі;
- Х2 – силовий роз'єм для підключення електродвигуна при роботі від перетворювача частоти;
- Х3 – роз'єм для підключення системи керування перетворювача.

В релейно-контакторному варіанті схеми силовий кабель електродвигуна підключається напряму до роз'єму Х1, а роз'єми Х2 та Х3 не задіяні.

При використанні схеми з перетворювачем частоти його силові вхідний та вихідний кабелі підключаються відповідно до роз'ємів Х1 та Х2, а кабель системи керування – до роз'єму Х3.

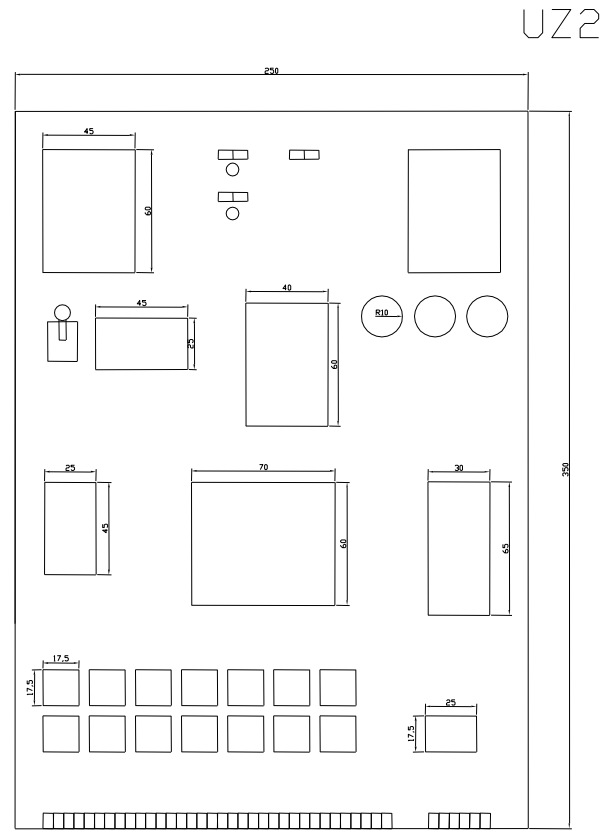
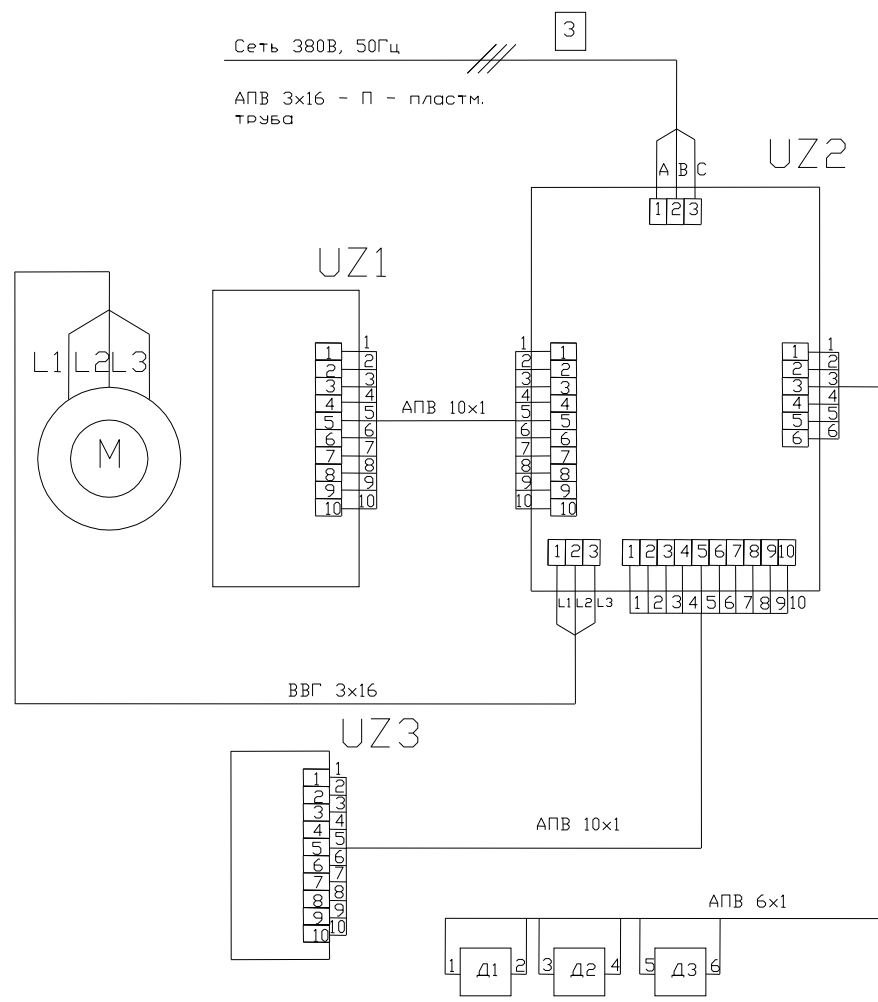


Рис. 4.5. Схема підключень електропривода ЛПУ

### Релейно-контакторна схема керування.

У релейно-контакторному варіанті системи електропривода використовується прямий пуск трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Це обумовлює простоту і високу надійність електропривода.

Для керування роботою електропривода використовується релейно-контакторна схема, представлена на рис. 4.6.

Живлення у схему подається за допомогою основного автомата АТ1. Цей автомат також використовується для контролю якості напруги (тобто контролю частоти, амплітуди і симетрії напруги мережі, відповідно 3 фази, 50Гц, 380В) та забезпечує захист від перевантажень і коротких замикань. При спрацьовуванні реле скидання РС автомат АТ1 відключає живлення.

Схема керування працює на постійному струмі і живиться за допомогою понижувального трансформатора TV1 і випрямляча.

У схемі передбачені наступні блокування:

- захист від пуску з перевантаженням (стоп підлоги кабіни). Цю функцію виконує контакт СПК;
- блокування запуску при спрацьовуванні вловлювачів - контакт СТЛ;
- блокування запуску при відкритих дверях ліфта (блокування замків дверей ліфта) - група контактів Д1 - Д3.

Схема працює наступним чином. Після включення автомата АТ1 на схему видається напруга, яка через трансформатор та випрямляч надходить у схему керування. Блокування повинні бути виключені.

Для підключення електродвигуна в «прямому» або «зворотному» напрямку служать контакти реле катода К1, К2 і реле анода А1, А2 (відповідні реле А и К). Напрямок руху вниз задає реле катода К, вгору - реле анода А.

Контакти F1 - F3, B1 - B4 є контактами селектора. Залежно від того, на якому поверсі перебуває кабіна, відповідає контакт буде розімкнутий (наприклад, якщо кабіна перебуває на першому поверсі, то буде розімкнутий

тільки перший контакт F1 - B1). При цьому є особливість - для другого поверху існує два положення контакту - при русі кабіни вниз замикаються F2 - B3 , а вгору - F2 - B2 .

Керування кабіною ліфта може здійснюватися як з пульта керування (кнопки КК1 - КК3), так і із самої кабіни (кнопки КП1 - КП3). При цьому якщо в кабіні перебуває вантаж, спрацьовує контакт ГК, що відключає керування з пульта. Після натискання кнопки потрібного поверху спрацьовує відповідне поверхове реле П1 - П3, і після цього стає на самоблокування (відповідні контакти в нижній частині схеми), а також підключається реле електромагніта кабіни ЕМК, яке замикає свої контакти і видає напругу на електромагніт кабіни і знімає напругу з реле освітлення кабіни РСВ.

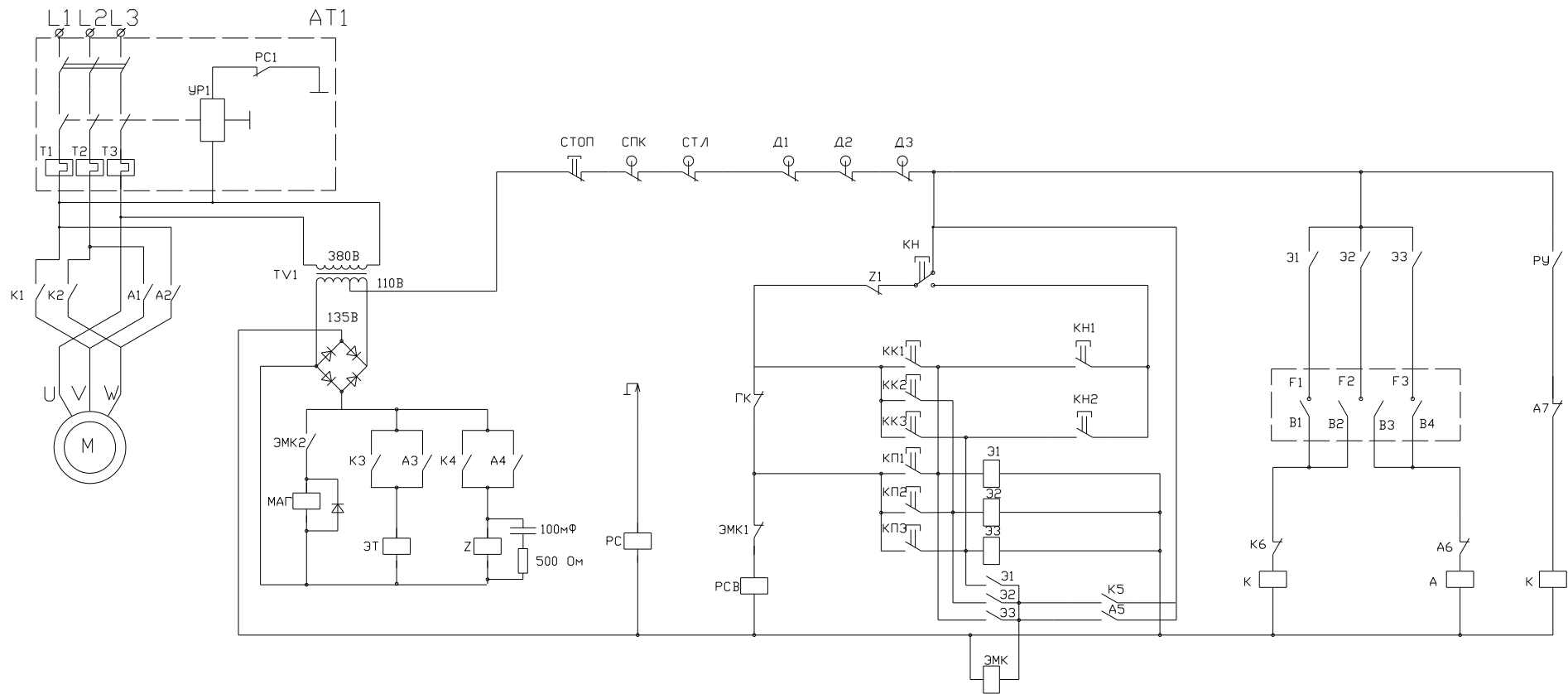


Рис. 4.6. Схема електрична принципова електропривода ЛПУ

Після спрацьовування поверхового реле замикаються відповідні контакти в ланцюзі селектора, в результаті чого видається живлення на реле катода К або реле анода А. Відповідне включене реле блокує відключене і замикає свої контакти в силовій частині схеми. При цьому починається рух кабіни. Одночасно видається живлення на реле гальма ЕТ, яке відгальмовує лебідку ліфта, а також на реле Z, що замикає свій контакт у ланцюзі кнопок поверхів і знімає можливість вибору поверху при русі кабіни.

В екстрених випадках робота схеми може бути перервана кнопкою «Стоп», при цьому спрацьовує реле скидання РС і відключає головний автомат; при цьому напруга зі схеми знімається.

Передбачено додатковий «двоповерховий» режим роботи ліфта з першого на третій поверх і назад. Для цього служить кнопка КН. В цьому режимі кнопками керування руху кабіни будуть кнопки КН1 і КН2.

У випадку аварійних ситуацій є можливість опустити кабіну ліфта вниз, для цього в схемі передбачена кнопка РУ, що видає живлення безпосередньо на реле катода К.

#### Система керування з використанням перетворювача частоти.

У частотно-регульованому варіанті електропривода в якості перетворювального пристрою використовується серійний перетворювач частоти ACS 550 Single Drive фірми АВВ. Принципова схема силовій частини перетворювача представлена на рис. 4.7.

Силова схема складається з нерегульованого випрямляча U1, індуктивно-ємнісного фільтра L-C, транзисторного інвертора U2 на шести ключах. При цьому індуктивний фільтр не тільки поліпшує форму струму, але і продовжує термін служби конденсаторного фільтра завдяки зменшенню пульсацій струму на конденсаторах. Середня частота комутації ключів інвертора становить 2-3 кГц, що забезпечує низькі комутаційні втрати, а також роботу з низьким рівнем високочастотного шуму, характерного для ШІМ-приводів. Характерною рисою також є працездатність перетворювача

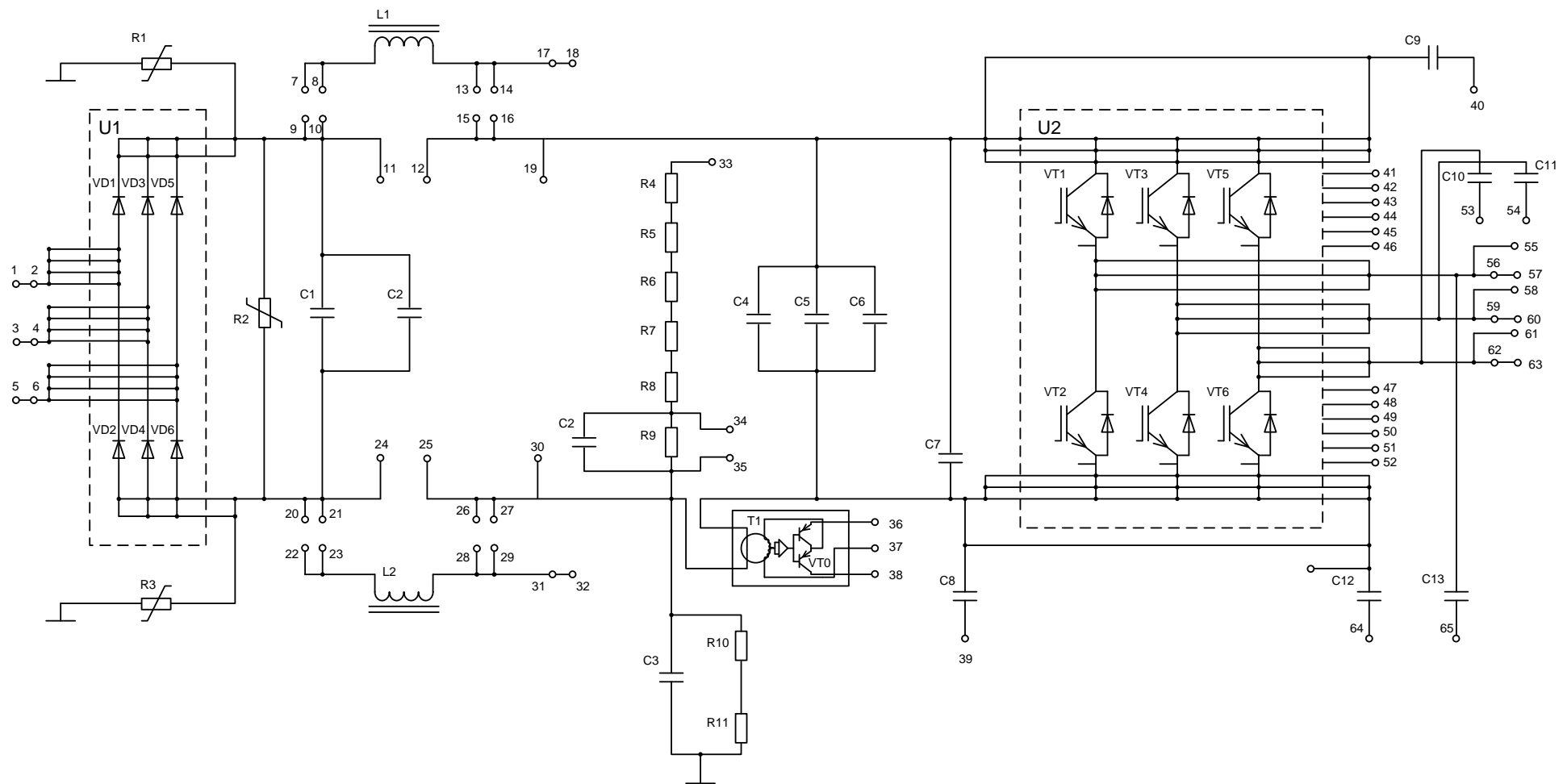


Рис. 4.7. Принципова схема силової частини перетворювача

при широкому діапазоні зміни напруги мережі в межах від 380 до 500 В. Перетворювач забезпечує короткочасну роботу при максимальній потужності асинхронного електродвигуна до 1,5 номінальної потужності перетворювача. При перевищенні цієї потужності система керування обмежує обертальний момент електродвигуна для захисту силового керованого випрямляча.

### 4.3. Програма роботи

1. Вивчити основні теоретичні відомості про ЛПУ.
2. Ознайомитись з лабораторною установкою, конструкцією основних вузлів і механізмів макета ЛПУ.
3. Вивчити роботу схеми керування електроприводом ЛПУ при живленні двигуна від мережі і від перетворювача частоти.
4. Зробити вибір ЕД для заданого значення навантаження і циклограми руху.
5. Експериментально дослідити статичні і динамічні режими роботи електропривода.
6. Розрахувати параметри заступної схеми асинхронного електродвигуна і механічної частини електропривода ЛПУ.
7. Виконати моделювання динамічних режимів електроприводу для типових задаючих і збурювальних дій при прямому пуску асинхронного двигуна.
8. Виконати моделювання динамічних режимів електроприводу для типових задаючих і збурювальних дій при частотному пуску асинхронного двигуна.

#### 4.4. Методичні вказівки до виконання роботи

##### Підготовка до виконання роботи.

1. Ознайомитися із призначенням, особливостями, принципом роботи, технічними характеристиками, основними кінематичними схемами, системами електропривода існуючих у нинішній час ЛПУ по цих методичних вказівках і рекомендованій літературі.
2. Вивчити програму роботи і методичні вказівки по її виконанню.
3. Вивчити методику налаштування і перевірки перетворювача частоти серії ACS 550 фірми АВВ.
4. Вивчити лабораторну установку, конструкцію основних вузлів і механізмів макета ЛПУ.
5. Вивчити роботу релейно-контакторної схеми керування ЛПУ при живленні двигуна від мережі.
6. Вивчити особливості роботи схеми керування ЛПУ при живленні двигуна від перетворювача частоти.
7. Ознайомитися з контрольними питаннями по лабораторній роботі.

##### Виконання лабораторної роботи.

1. Підключити живлення до лабораторної установки (380 В, 50 Гц, 3 фази).
2. Для дослідження релейно-контакторного варіанту схеми силовий кабель електродвигуна підключити напряму до роз'єму Х1; при цьому роз'єми Х2 та Х3 не задіяні.
3. Зробити пробний пуск електропривода при живленні двигуна від мережі.
4. Ознайомитись з роботою схеми при керуванні із кнопочних станцій, установлених на поверхах і у кабіні.
5. Експериментально дослідити роботу електропривода ЛПУ при живленні двигуна від мережі для режимів підйому і опускання кабіни з

першого поверху на заданий і назад. Зафіксувати час підйому і опускання за допомогою секундоміра.

6. Підключити перетворювач частоти. Для цього необхідно: від'єднати силовий кабель живлення електродвигуна від колодки X1; підключити вхідний та вихідний силові кабелі перетворювача частоти відповідно до роз'ємів X1 та X2, а кабель системи керування – до роз'єму X3.

7. Зробити перевірку настроювання параметрів перетворювача частоти. Методика настроювання і перевірки перетворювача частоти серії наведена у паспорті перетворювача.

8. Зробити пробний пуск електропривода при живленні двигуна від перетворювача частоти.

9. Експериментально дослідити роботу електропривода ЛПУ при живленні двигуна від перетворювача частоти для режимів підйому і опускання кабіни з першого поверху на заданий і назад. Зафіксувати час підйому і опускання за допомогою секундоміра. Записати усталені значення частоти, швидкості, струму і моменту електродвигуна за показниками дисплея перетворювача частоти.

#### Самостійна робота.

1. Відповідно до заданого номера варіанта (див. табл. Д.1) розрахувати необхідну потужність електродвигуна.

2. Розрахувати параметри математичної моделі електродвигуна, встановленого на макеті ЛПУ.

3. Розрахувати параметри механічної частини електропривода. При розрахунках використовувати технічні дані існуючого обладнання макету ЛПУ з урахуванням величини вантажу згідно табл. Д1.

4. Розрахувати параметри структурної схеми системи електропривода ЛПУ. Методика розрахунку параметрів представлена в розділі 4.

5. Виконати моделювання на ЕОМ статичних і динамічних режимів роботи електропривода при живленні двигуна від мережі для режимів пуску, накиду навантаження і гальмування згідно табл. Д2.

6. Виконати (за вказівкою викладача) моделювання на ЕОМ статичних і динамічних режимів роботи електропривода при живленні двигуна від перетворювача частоти для режимів пуску, накиду навантаження і гальмування згідно табл. Д2. Усталену частоту перетворювача прийняти за даними експериментальних досліджень.

7. Порівняти результати моделювання і експериментальних досліджень. Зробити висновки по роботі.

Методика розрахунку потужності електродвигуна.

Вибір потужності електродвигуна здійснюється на основі наступних вихідних даних:

– маса вантажу	$M_B$ , кг;
– маса кабіни	$M_K = 80$ кг;
– маса противаги	$M_P = 90$ кг;
– висота підйому	$H$ , м;
– висота між поверхами	$h = 1,2$ м;
– швидкість руху	$v$ , м/с;
– максимальне прискорення	$a$ , м/с <sup>2</sup> ;
– час паузи	$t_P$ , с;
– діаметр канатоведучого шківа	$D_{Ш} = 0,4$ м;
– діаметр напрямного шківа	$D_{ШН} = 0,29$ м;
– маса канатоведучого шківа	$m_{Ш} = 30$ кг;
– маса напрямного шківа	$m_{ШН} = 10$ кг;
– кількість канатів	$n = 3$ ;
– діаметр канатів	$d_K = 0,01$ м;
– маса погонного метра каната	$m_K = 0,3$ кг;
– передаточне число редуктора	$i = 45$ ;

– к.к.д. редуктора і механізма

$$\eta = 0,6.$$

Примітка: вихідні дані  $M_B$ ,  $H$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $t$  числові значення для яких не вказані, визначаються згідно номера варіанту (див. Додаток).

Циклограма роботи ЛПУ представлена на рис. 3.1.

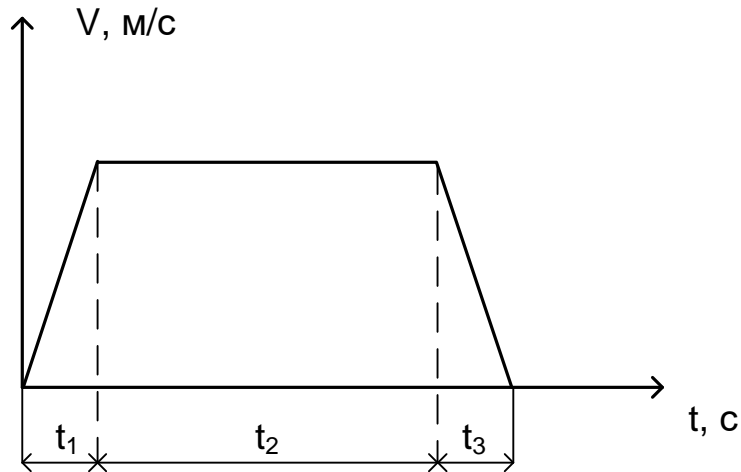


Рис. 4.8. Циклограма роботи ЛПУ

Розрахунок виконуємо для випадку підйому кабіни з вантажем з першого поверху на задану висоту.

Час пуску і гальмування при заданому прискоренні дорівнює

$$t_1 = t_3 = v/a, \text{ c}$$

Шлях, пройдений кабіною зі сталою швидкістю

$$X_2 = H - v \cdot t_1, \text{ м}$$

Час руху зі сталою швидкістю

$$t_2 = X_2 / v, \text{ c}$$

Час роботи ЛПУ за один цикл

$$T_p = t_1 + t_2 + t_3, \text{ c}$$

Шлях, пройдений кабіною при пуску і гальмуванні

$$X_1 = X_3 = a \cdot t_1^2 / 2, \text{ м}$$

Статичне зусилля на канаті (шківів) для випадку підйому вантажу

$$F_{ст} = (M_B + M_k - M_n)g, \text{ Н}$$

Рухієне зусилля на канаті з урахуванням динамічного зусилля

$$F_{\text{дв}} = F_{\text{ст}} + m_{\text{сум}} \cdot a, \text{ Н}$$

$$\text{де } m_{\text{сум}} = M_{\text{в}} + M_{\text{к}} + M_{\text{п}} + m_{\text{ш}} + m_{\text{шн}} + 2 \cdot m_{\text{к}} \cdot n \cdot \text{Н}, \text{ кг}$$

Для побудови діаграми рушійних зусиль визначимо їхнє значення на характерних ділянках шляху. У зв'язку з тим, що дана система є врівноваженою, необхідно розрахувати зусилля при розгоні  $F_1$ , рівномірному ході  $F_2$  і при гальмуванні  $F_3$

$$F_1 = F_{\text{дв}}, \text{ Н}$$

$$F_2 = F_{\text{ст}}, \text{ Н}$$

$$F_3 = F_{\text{ст}} - m_{\text{сум}} \cdot a, \text{ Н}$$

Діаграма рушійних зусиль для розрахованих значень представлена на рис. 4.9.

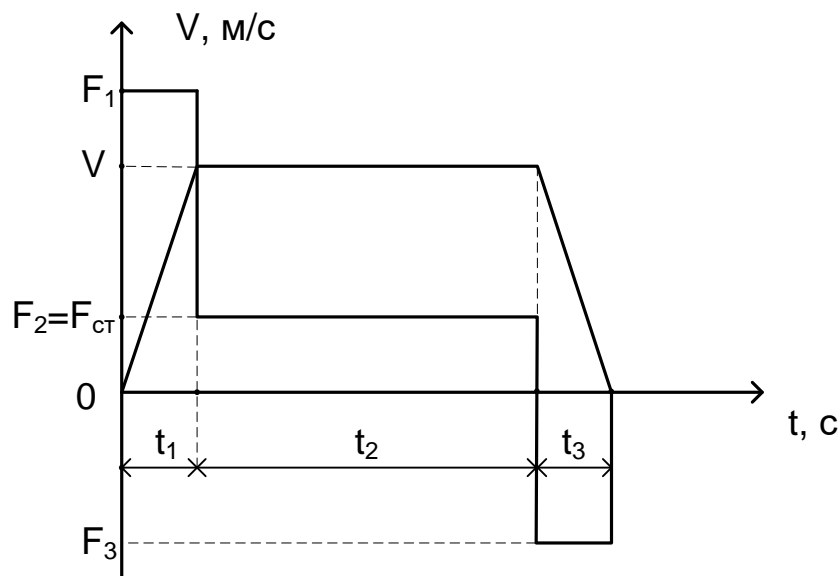


Рис. 4.9. Діаграма зусиль і швидкості

Еквівалентне зусилля на канатах (шківі)

$$F_3 = \sqrt{\frac{F_1^2 t_1 + F_2^2 t_2 + F_3^2 t_3}{T_p}}, \text{ Н}$$

Еквівалентне значення моменту на шківі і на валу двигуна рівні, відповідно

$$M_3 = F_3 D_{\text{ш}} / 2, \text{ Н}$$

$$M_{3\text{д}} = M_3 / (i \cdot \eta), \text{ Нм}$$

Еквівалентна розрахункова потужність двигуна

$$P_{эд} = M_{эд} \cdot \omega_d k_3, \text{ Вт}$$

де  $\omega_d = 2\pi n / 60$ , рад/с – кутова швидкість двигуна;  $k_3 = 1,3$  – коефіцієнт запасу.

Розрахункова тривалість вмикання

$$TB = \frac{T_p}{T_p + t_{п}} \cdot 100\%$$

де  $t_{п}$  – час паузи.

Еквівалентна розрахункова потужність двигуна приводиться до найближчого стандартного значення  $TB_{ст} = 40\%$ . Тоді дійсне значення потужності буде дорівнювати

$$P_d = P_{эд} \sqrt{\frac{TB}{TB_{ст}}}, \text{ Вт}$$

Необхідна частота обертання електродвигуна

$$n_d = 30 \cdot \omega_d / \pi, \text{ об/хв}$$

Розрахункові значення потужності  $P_d$  і швидкості обертання  $n_d$  є вихідними даними для вибору двигуна.

Подальші розрахунки виконуються для устанавленого на макеті ЛПУ асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором типу Z132.12.4, який має наступні параметри:

– номінальна потужність	$P_n = 4 \text{ кВт}$
– номінальна напруга	$U_n = 380 \text{ В}$
– частота живильної мережі	$f = 50 \text{ Гц}$
– момент інерції	$J_d = 0,48 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
– синхронна частота обертання	$n_c = 1500 \text{ об/хв}$
– номінальний струм	$I_n = 9,8 \text{ А}$
– пусковий струм	$I_{п} = 34,3 \text{ А}$
– номінальний момент	$M_n = 26,4 \text{ Нм}$
– максимальний момент	$M_k = 64 \text{ Нм}$
– тривалість вмикання	$TB = 40\%$

– коефіцієнт потужності

$$\cos\varphi = 0,67.$$

Методика математичного моделювання.

Електропривод макета ЛПУ виконаний на основі трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. У варіанті схеми з релейно-контакторним керуванням пуск електродвигуна здійснюється прямим підключенням до мережі.

У схемі з використанням перетворювача частоти забезпечується можливість плавного пуску електродвигуна і більша точність зупинки кабіни.

Для дослідження динамічних режимів розглянутих систем необхідне використання математичних моделей асинхронного електродвигуна і механічної частини ЛПУ.

Математична модель асинхронного електродвигуна.

Математичний опис процесів перетворення енергії в асинхронному електродвигуні являє собою складне завдання у зв'язку з істотною нелінійністю рівнянь, обумовленої добутком змінних. Двигун є трифазним, що ускладнює математичне моделювання через збільшення числа рівнянь, тому процеси доцільно представляти в еквівалентній двофазній моделі. Умовою адекватності моделей є інваріантність потужності машини при перетворенні рівнянь.

При рішенні завдання перетворення кожна реальна змінна двигуна – напруга, струм, потокозчеплення – представляється у вигляді вектора. Напрямок вектора пов'язаний з віссю координат, що відповідає даній обмотці (статора або ротора). Зі статором жорстко зв'язана ортогональна система координат з осями  $(\alpha, \beta)$ , а з ротором – система координат  $(d, q)$ . Всі розрахункові змінні представляються в системі координат  $(U, V)$ , яка обертається щодо нерухомого статора зі швидкістю  $\omega_s$ . Перетворення реальних змінних двигуна в осях  $(\alpha, \beta)$  або  $(d, q)$  у розрахункові  $(U, V)$  і назад здійснюється за допомогою проекцій відповідних векторів змінних на ці осі відповідно до відомих геометричних закономірностей (див. рис. 4.10).

Перехід до системи координат  $(\alpha, \beta)$  здійснюється при умовах  $U=\alpha$ ,  $V=\beta$ ,  $\omega_c=0$ .

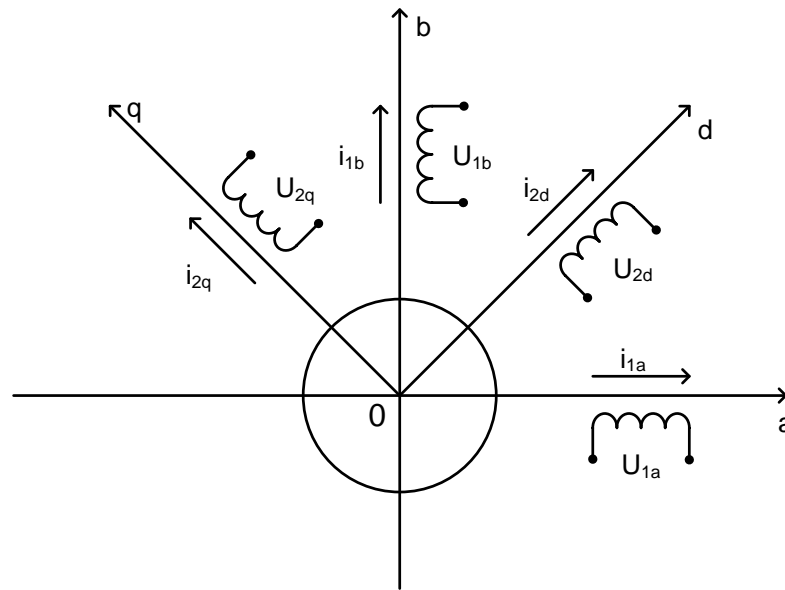


Рис. 4.10. Змінні в системі координат  $(U, V)$

Перетворені рівняння для струмів, потокозчеплень і похідних потокозчеплень мають такий вигляд:

$$i_{1\alpha} = \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left( U_{1\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\alpha} \right)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{R_1 + \sigma p} \left( U_{1\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} p \psi_{2\beta} \right)$$

$$\psi_{2\alpha} = \frac{1}{p + \alpha} (L_{12} \alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ел}} \psi_{2\beta})$$

$$\psi_{2\beta} = \frac{1}{p + \alpha} (L_{12} \alpha i_{1\beta} - \omega_{\text{ел}} \psi_{2\alpha})$$

$$p \psi_{2\alpha} = L_{12} \alpha i_{1\alpha} - \omega_{\text{ел}} \psi_{2\beta} - \alpha \psi_{2\alpha}$$

$$p \psi_{2\beta} = L_{12} \alpha i_{1\beta} + \omega_{\text{ел}} \psi_{2\alpha} - \alpha \psi_{2\beta}$$

Момент двигуна в координатах статора  $(\alpha - \beta)$  дорівнює

$$M = \frac{3}{2} P_n \frac{L_{12}}{L_2} (i_{1\beta} \psi_{2\alpha} - i_{1\alpha} \psi_{2\beta})$$

Еквівалентна двофазна математична модель асинхронного двигуна в координатах статора ( $\alpha, \beta$ ) представлена на рис. 4.11.

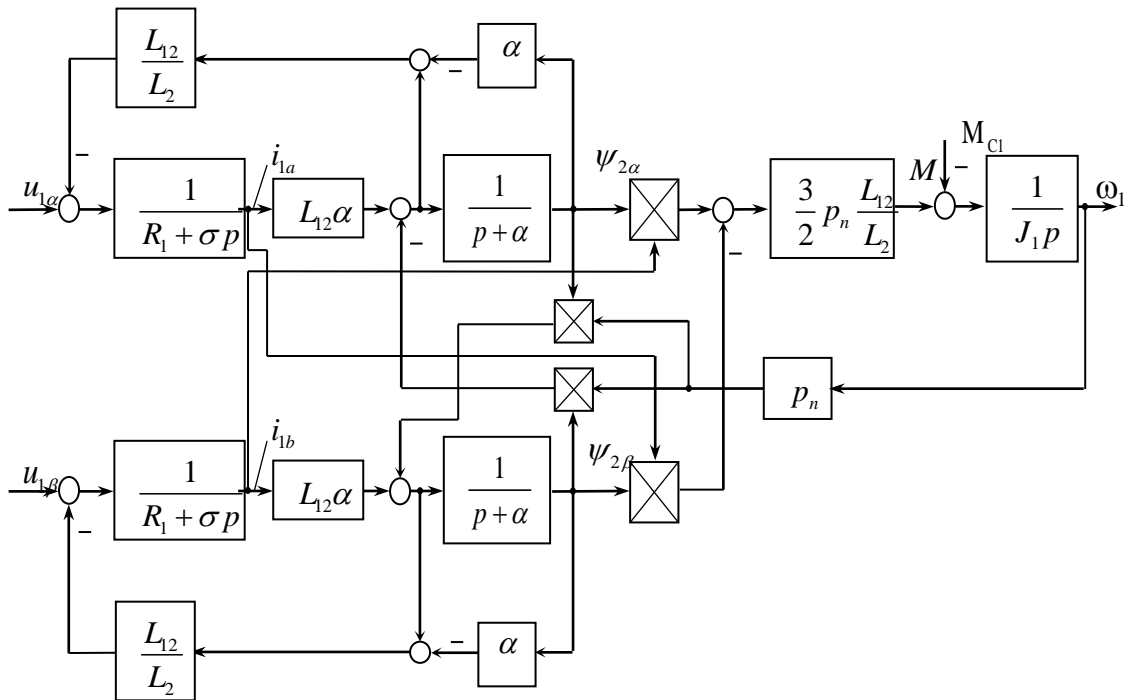


Рис. 4.11. Структурна схема асинхронного двигуна

У наведених рівняннях і на рис. 4.11 прийняті наступні позначення:

- $u_{1\alpha}, u_{1\beta}, i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  – проекції напруги й струму статора на осі ( $\alpha, \beta$ );
- $R_1$  – активний електричний опір статора;
- $\psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$  – проекції потокозчеплення ротора;
- $p_n$  – число пар полюсів двигуна;
- $\omega_1$  – кутова швидкість двигуна;
- $L_1, L_2, L_{12}$  – індуктивності обмоток статора, ротора і їх взаємоддуктивність;
- $\sigma = (L_1 L_2 - L_{12}^2) / L_2$  - коефіцієнт розсіювання;
- $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$ .

Механічна частина електродвигуна без урахування пружності каната описується відомим рівнянням динаміки

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{c1}$$

де  $J_1$  – сумарний момент інерції електродвигуна і навантаження;  $M_{c1}$  – статичний момент.

Трифазний асинхронний двигун живиться від мережі симетричною синусоїдальною напругою

$$U_A = U_m \sin(2\pi f_1 t)$$

$$U_B = U_m \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_C = U_m \sin\left(2\pi f_1 t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

де  $U_m, f_1$  – амплітуда і частота напруги живлення.

Перехід до системи координат  $(\alpha, \beta)$  здійснюється на підставі відомих співвідношень (див. рис. 4.12):

$$U_A + U_B + U_C = 0$$

$$U_{1\alpha} = U_A - U_C \cos 60^\circ - U_B \cos 60^\circ = U_A - (U_C + U_B) = \frac{3}{2} U_A$$

$$U_{1\beta} = U_B \cos 30^\circ - U_C \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} (U_B - U_C)$$

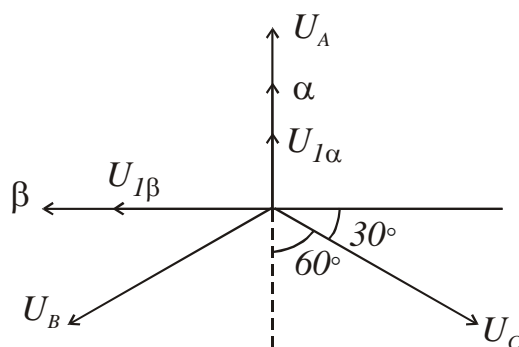


Рис. 4.12. Перехід від трифазної системи координат до двофазної

Структурна схема даного переходу представлена на рис. 4.13. При цьому амплітуда напруги двигуна задається значенням  $U_m$ , а частота напруги – значенням  $f_1$ .

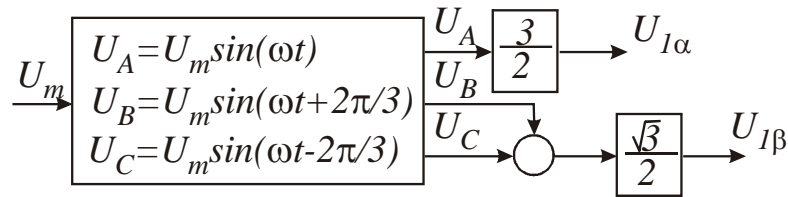


Рис. 4.13. Еквівалентна двофазна напруга двигуна

### Математична модель механічної частини ЛПУ

Структурна схема механічної частини макета ЛПУ відповідає кінематичній схемі з канатоведучим шківом.

Розрахункова схема механічної частини ліфтової установки показана на рис. 4.14. Схема складена для найбільш характерного випадку роботи установки – підйому вантажу з нижнього поверху. У цьому випадку момент інерції першої маси  $J_1$  включає момент інерції двигуна, редуктора, шківа, маховика і противаги. Друга маса з моментом інерції  $J_2$  складається з маси кабіни і вантажу. Приведемо всі параметри розрахункової схеми до кутової швидкості приводного електродвигуна.

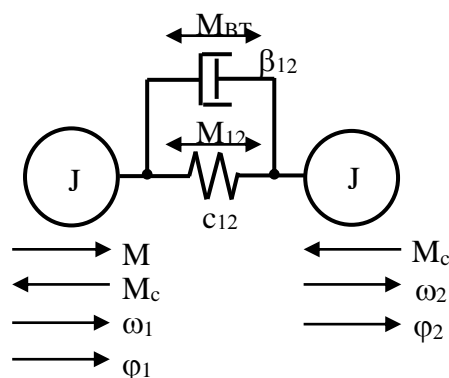


Рис. 4.14. Розрахункова схема ліфтової установки

Рівняння руху для першої маси механічної частини ліфтової установки

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) - \beta_{12} (\omega_1 - \omega_2) - M_{c1}.$$

Аналогічне рівняння руху для другої маси має вигляд

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - M_{c2}.$$

У даних рівняннях руху мас вираження  $M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$  являє собою пружний момент. Похідна пружного моменту дорівнює

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = c_{12}(\omega_1 - \omega_2).$$

У результаті одержуємо систему рівнянь, що описує рух механічної частини ліфтової установки

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{вт} - M_{c1} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} + M_{вт} - M_{c2} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2) \\ M_{вт} = \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) \end{cases}.$$

Останнє рівняння в системі визначає момент внутрішнього в'язкого тертя  $M_{вт}$ .

Структурна схема, що відповідає складеній системі рівнянь, представлена на рис. 4.15.

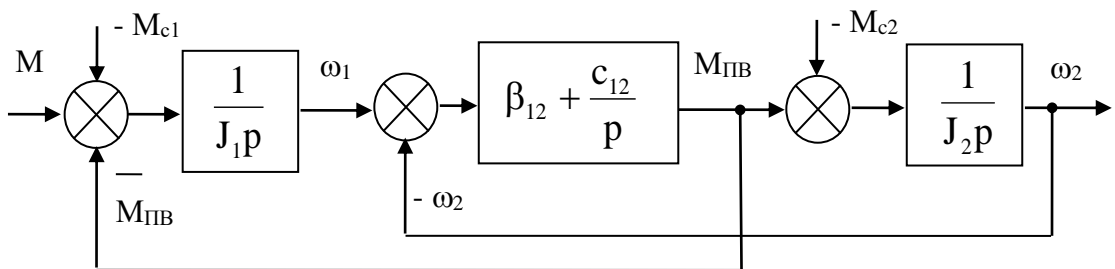


Рис. 4.15. Структурна схема механічної частини ліфтової установки

Структурна схема реалізує сумарний пружно-в'язкий момент  $M_{ПВ} = M_{12} + M_{вт}$ .

Методика розрахунку параметрів математичної моделі електропривода

Параметри математичної моделі електропривода макета ЛПУ розраховуються на підставі паспортних даних обраного раніше електроустаткування, даних розрахункової кінематичної схеми, а також вихідних даних.

Розрахунок параметрів асинхронного електродвигуна

Установлений на макеті ЛПУ асинхронний двигун Z132.12.4 має наступні обмотувальні дані:

- $R_1=0,427$  Ом – активний електричний опір обмотки статора;
- $R_2=1,19$  Ом – активний електричний опір обмотки ротора;
- $X_1=2,989$  Ом – індуктивний електричний опір обмотки статора;
- $X_2=2,248$  Ом – індуктивний електричний опір обмотки ротора;
- $X_{12}=66,15$  Ом – взаємоіндуктивний електричний опір обмоток;
- $K_e=1,09$  – коефіцієнт трансформації.

Розрахунок параметрів структурної схеми асинхронного двигуна здійснюється за формулами:

- номінальна кругова частота мережі

$$\omega_e = 2\pi f_{1H}, \text{ рад/с,}$$

де  $f_{1H}=50$  Гц – номінальна частота мережі;

- індуктивність статора

$$L_1 = \frac{X_1 + X_{12}}{\omega_e}, \text{ Гн}$$

- приведена індуктивність ротора

$$L'_2 = \frac{X_2 K_e^2 + X_{12}}{\omega_e}, \text{ Гн}$$

- взаємоіндуктивність двигуна

$$L_{12} = \frac{X_{12}}{\omega_e}, \text{Гн}$$

- коефіцієнти двигуна

$$\alpha = \frac{R_2 K_e^2}{L_2},$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2' - L_{12}^2}{L_2'}.$$

### Розрахунок параметрів механічної частини електропривода

Момент інерції першої маси  $J_1$  включає момент інерції двигуна, маховика, редуктора, шківів, противаги і канатів. Друга маса з моментом інерції  $J_2$  складається з маси кабіни з вантажем і частини канатів. Параметри розрахункової схеми приведені до валу електродвигуна.

Момент інерції першої маси

$$J_1 = J_d + J_m + J_p' + J_{ш}' + J_{п}' + J_{кн}', \text{кг} \cdot \text{м}^2,$$

де  $J_p' = 0,2J_a$  – приведений момент інерції редуктора;

$$J_{ш}' = \frac{m_{ш} D_{шш}^2}{4i^2} – \text{приведений момент інерції шківів};$$

$$J_{п}' = \frac{M_{п} D_{ш}^2}{4i^2} – \text{приведений момент інерції противаги};$$

$$J_{кн}' = \frac{M_{кн} D_{ш}^2}{8i^2} – \text{приведений момент інерції канатів};$$

$$M_{кн} = H \cdot m_k \cdot n, \text{кг} – \text{маса канатів}.$$

Момент інерції другої маси

$$J_2 = J_r' + J_k' + J_{кн}', \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

де  $J_r' = \frac{M_r D_{ш}^2}{4i^2} – \text{приведений момент інерції вантажу}; J_k' = \frac{M_k D_{ш}^2}{4i^2} –$

приведений момент інерції кабіни.

Приведена жорсткість канатів

$$c_{12} = \frac{c_m n D_{ш}^2}{H i^2}, \text{Н} \cdot \text{м}$$

де  $c_m=10^6$  Н – жорсткість одного метра каната.

Приведений коефіцієнт в'язкого тертя

$$\beta_{12} = K \cdot c_{12}$$

де  $K=0,004$  – коефіцієнт пропорційності для сталевго каната.

Статичний момент першої маси

$$M_{c1} = \frac{M_{II} g D_{III} \eta}{2i}, \text{ Нм}$$

Статичний момент другої маси

$$M_{c2} = \frac{(M_{I} + M_{K}) g D_{III}}{2i\eta}, \text{ Нм}$$

Методика дослідження динамічних режимів електроприводу.

Двофазна еквівалентна математична модель асинхронного двигуна в координатах статора, а також розрахункова модель двомасової механічної частини ЛПУ дозволяють виконати моделювання динамічних режимів і дослідження якості управління електропривода макету ліфтової установки.

Дослідження якості управління електропривода ЛПУ здійснюється шляхом моделювання на ЕОМ за допомогою програми "SIMULINK" програмного комплексу "MATLAB". На підставі структурної схеми асинхронного двигуна, представленої на рис. 4.11 і структурної схеми механічної частини, складається відповідна модель електропривода ЛПУ (рис. 4.16) і двофазна модель асинхронного двигуна (рис. 4.17) у пакеті "SIMULINK".



характер, обумовлений значним моментом інерції першої маси розрахункової схеми і лише на початку спостерігається невелике коливання швидкості двигуна.

На рис. 4.19 представлений графік приведеної кутової швидкості кабіни ліфта. Як видно з рисунка, на початку перехідного процесу спостерігається коливання швидкості кабіни, більше коливань швидкості електродвигуна. Це обумовлено пружністю канатів, а також дією досить великого активного моменту опору  $M_{c2}$ . Закінчення перехідного процесу характеризується аперіодичним характером, що забезпечується демпфуючою дією моменту двигуна.

На рис. 4.20 представлений графік пружно-в'язкого моменту при пуску. Цей момент обумовлений пружністю сталевих канатів, за допомогою яких підвішені кабіна і противага ліфта. Перехідний процес по моменту спочатку має сильно виражений коливальний характер. Потім коливання монотонно затихають і наприкінці перехідного процесу пружно-в'язкий момент досягає значення активного моменту опору  $M_{c2}$ .

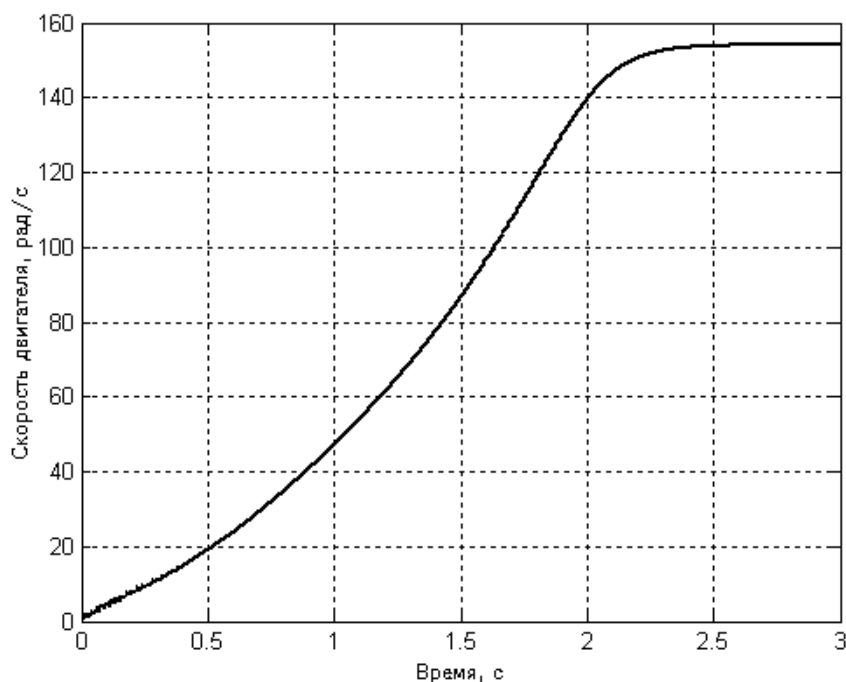


Рис. 4.18. Перехідний процес швидкості двигуна при пуску

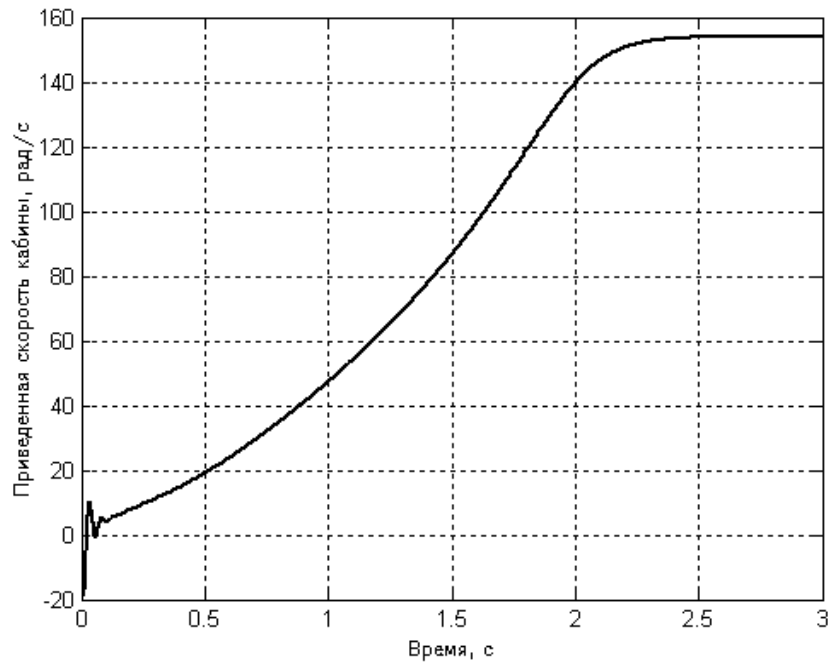


Рис. 4.19. Перехідний процес приведеної кутової швидкості кабіни при пуску

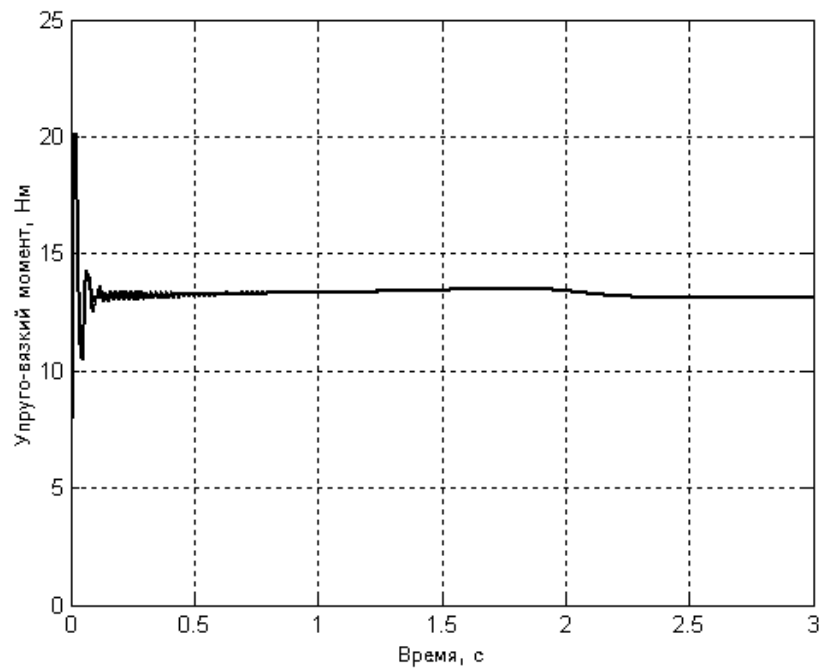


Рис. 4.20. Перехідний процес пружно-в'язкого моменту при пуску

#### 4.5. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

1. Титульний аркуш.
2. Програма роботи.
3. Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
4. Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
5. Розраховані параметри динамічної моделі системи керування.
6. Структурні схеми, побудовані у MatLab/Simulink.
7. Графіки перехідних процесів.
8. Висновки по виконанню лабораторної роботи.

#### 4.6. Контрольні запитання

1. З яких основних конструктивних елементів складається ЛПУ?
  2. Які кінематичні схеми використовуються в електроприводах ЛПУ?  
Поясніть їх переваги та недоліки.
  3. Які види захистів і блокувань передбачені в схемах керування ЛПУ?
  4. Яким основним вимогам повинен відповідати електропривод ЛПУ?
  5. Які перетворення координат здійснюються при складанні математичної моделі асинхронного електродвигуна?
  6. Як впливає наявність пружності канатів на перехідні процеси по швидкості двигуна та кабіни?
  7. Поясніть роботу релейно-контакторної схеми керування електроприводом ЛПУ?
  8. Поясніть принцип роботи перетворювача частоти з ШІМ.
  9. Який вигляд мають механічні характеристики системи ПЧ-АД?
- Мета використання ПЧ в ЛПУ?

## Вихідні дані для розрахунків та досліджень

Таблиця Д.1

Варіанти завдань для розрахунку потужності електродвигуна

№ Вар.	Маса вантажу $M_B$ , кг	Висота підйому $H$ , м	Швидкість руху $V$ , м/с	Максимальне прискорення (сповільнення) $a$ , м/с <sup>2</sup>	Час паузи $t_p$ , с
1	100	3,7	0,6	2,0	6
2	80	3,7	0,8	2,2	5
3	60	4,9	0,9	2,4	4
4	40	4,9	1,0	2,6	3
5	120	3,7	0,5	1,8	10
6	130	3,7	0,4	1,7	12
7	140	2,5	0,3	1,6	14
8	150	2,5	0,2	1,5	15

Таблиця Д.2

Варіанти моделювання перехідних процесів

№ Вар.	Прямий пуск	Накид навантаження	Гальмування
1	+	-	-
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	+	-
5	+	-	-
6	+	+	-
7	+	+	-
8	+	-	+

## Лабораторна робота №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

Тривалість лабораторної роботи – 4 год.

**Мета роботи** – дослідження характеру зміни енергетичних характеристик електроприводу конвеєрної системи при різноманітних технологічних умовах.

#### 5.1. Основні теоретичні відомості

Механізми безперервного транспорту широко застосовуються в різних галузях промисловості для механізації і автоматизації допоміжних операцій, наприклад транспортування руди, палива, сировини, деталей машин, кормів, продуктів і т. д.

Найбільш поширеними механізмами безперервного транспорту є конвеєри різних типів, конструкція яких визначається характером переміщуваних вантажів, масою і швидкістю їх руху. Сипучі вантажі переміщуються стрічковими конвеєрами, штучні - пластинчастими, роликowymi і підвісними.

Основною конструктивною частиною конвеєра є замкнутий, тяговий орган, виконаний зі спеціальної текстильної, прогумованої або гумового-тросової стрічки. Він може бути виконаний з ланцюгів і канатів.

Застосування тієї чи іншої конструкції тягового елемента обумовлюється не тільки характером переміщуваного вантажу, а й умовами навколишнього середовища, в якій працює механізм. Тяговий орган зазвичай приводиться в рух через провідні барабани, зірочки, багатогранні блоки і подібні пристрої за допомогою електричних двигунів.

Основними характеристиками приводного механізму є потужність двигуна, передавальне число редуктора та створюваний найбільший крутний момент, його фрикційна здатність, тобто, коефіцієнт зчеплення барабана зі стрічкою. Фрикційна здатність приводного барабана також залежить від кута охоплення барабана стрічкою. Для збільшення коефіцієнта зчеплення стрічки з барабаном останній покривається гумою або конвеєрною стрічкою. Привід може бути з одним барабаном - однобарабанний або з декількома – двох - та трьохбарабанний. Збільшення числа приводних барабанів підвищує тягову здатність приводу. У приводах застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним роторами.

Проведення дослідження здійснюється на базі розробленого експериментального стенда, який у спрощеному вигляді відтворює конвеєрну систему, зовнішній вигляд якої представлена на рис. 5.1.

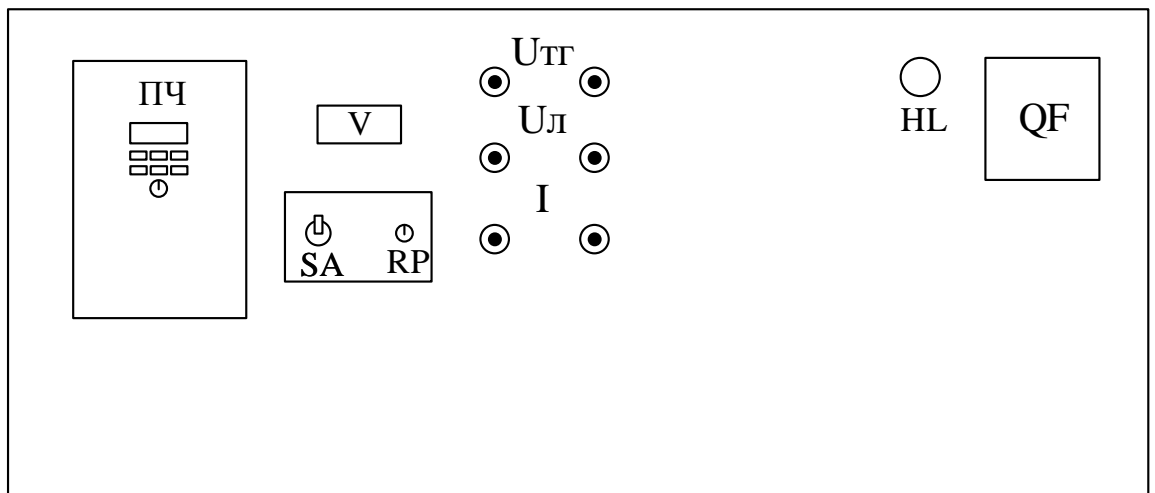


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд передньої панелі експериментального стенду стрічкового конвеєра

На схемі позначено ПЧ – перетворювач частоти, V – вольтметр для вимірювання напруги на виході тахогенератора, SA - 3-х позиційний перемикач, RP - потенціометр, Uтг – роз’єми для знаття напруги тахогенератора, Uл - роз’єми для знаття лінійної напруги на виході ПЧ , I –

струм в одній з фаз на виході ПЧ, HL – світлова індикація подачі живлення після автоматичного вимикача, QF – автоматичний вимикач.

## 5.2. Програма роботи

1. Ознайомитися з лабораторним стендом, приладами контролю та керування.

2. Включити стенд, повернути настройки перетворювача частоти до заводських установок. Виконати базову настройку перетворювача частоти, провести ідентифікацію параметрів двигуна. Налаштувати перетворювач частоти на алгоритм керування асинхронним двигуном  $u/f = \text{const}$ .

3. Виконати підключення та налаштування системи тестування електроприводів (СТЕП).

4. Запустити приводний двигун конвеєрної системи у номінальному режимі роботи і виміряти лінійну швидкість обертання конвеєрної стрічки без навантаження при заданій частоті від 0 до 50 Гц за допомогою СТЕП та побудувати відповідну залежність.

5. За допомогою СТЕП потрібно зняти напругу та струм на виході перетворювача частоти, напругу тахогенератора при пуску для заданих двох частот, 15 Гц, 25 Гц у випадку без навантаження.

6. Виконати аналогічні досліді описані в пункті 5, але для випадку пуску з прикладеним навантаженням, яке повинне обиратися з діапазону 200-240 Н.

7. Після проведення дослідів побудувати графіки залежності  $U_{\text{л}}=f(t)$ ,  $I=f(t)$ ,  $U_{\text{тг}}=f(t)$ ,  $v=f(t)$ , тобто лінійної напруги, струму в одній з фаз та напруги тахогенератора у середовищі MATLAB Simulink.

8. Провести аналогічні досліді для випадку з наростаючим навантаженням від 0 до 220 Н.

9. З отриманих вище характеристик та моделювання електромеханічної роботи конвеєра потрібно визначити діапазон зміни напруги, при

мінімальному діапазоні частот при прикладанні моменту навантаження від 0 до 220 Н, з просіданням швидкості не більше 0,5 м/с. Налаштувати перетворювач частоти на нову задану студентом залежність  $u/f$  та провести аналогічні дослідження пунктам 5 – 8, але з регулюванням частоти відповідно до прикладеного моменту навантаження. Типи кривих і її налаштування описано у методичних вказівках даної лабораторної роботи.

10. Оцінити енергетичні показники досліджуваної системи для двох випадків налаштування системи та зробити висновки.

### 5.3. Опис лабораторної установки

З метою реалізації лабораторного практикуму розроблено експериментальний стенд, функціональна схема якого приведена на рисунку 5.1

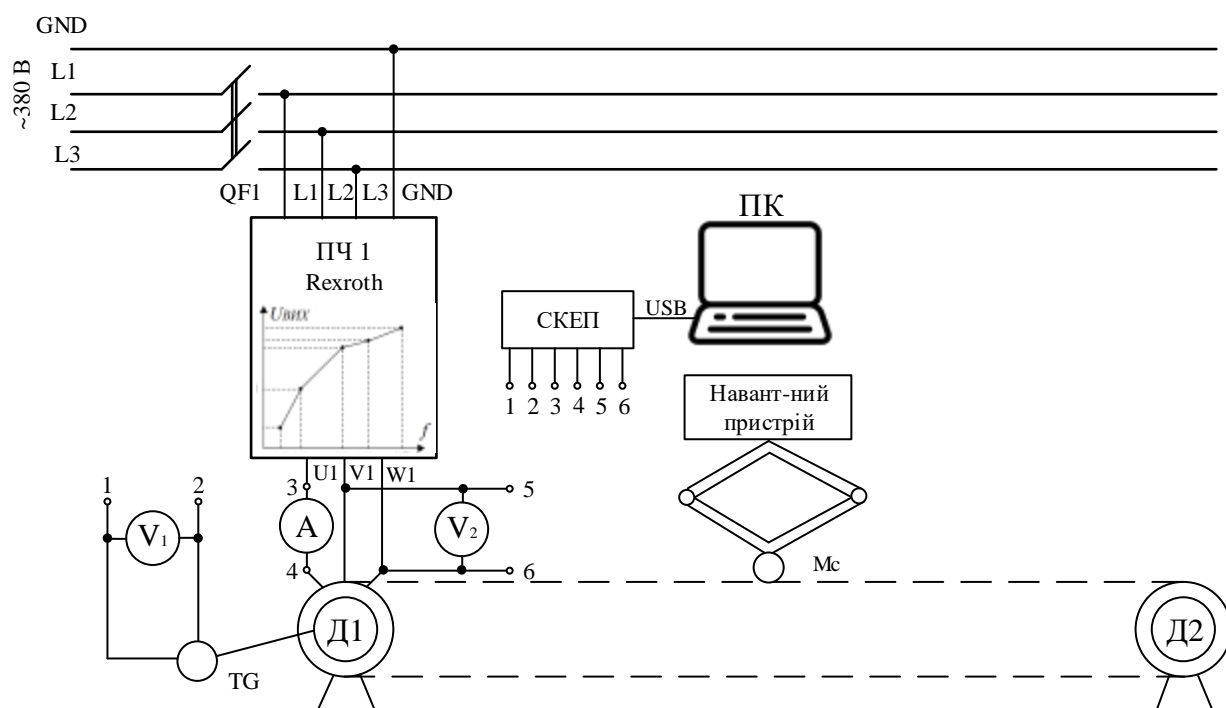


Рисунок 5.2 – Функціональна схема експериментального стенду стрічкового конвеєра

На рисунку прийняті наступні позначення: електрична трифазна мережа змінного струму 380 В з фазами L1-L3; захисне заземлення GND; автоматичний вимикач QF1, персональний комп'ютер ПК; перетворювач частоти ПЧ, два електродвигуни Д1, Д2; U,V,W – виходи перетворювача частоти; Mc– статичний момент, TG - тахогенератор, та відповідні входи/виходи підключень до СТЕП, портативного комп'ютера, тахогенератора, функціонального перетворювача.

Механічна частина стенду включає в себе два електродвигуни Д1, Д2 серії АОЛ21/4, потужністю по 0,27 кВт. Вали роторів електродвигунів через шківки з'єднані гнучким зв'язком. Дана схема може відтворювати роботу конвеєра при однодвигунному режимі роботи. Для реалізації системи керування використано перетворювач частоти Vocsh Rexroth.

Тахогенератор ТМГ-30П використовують у вигляді датчика в конвеєрній системі і вважається малопотужною машиною постійного струму зі збудженням від постійних магнітів і дозволить після обрахунку вимірювати швидкість обертання експериментальної конвеєрної стрічки. Виходи з тахогенератора підключені до цифрового оброблюючого пристрою, який показуватиме  $U_{TG}$  відповідно частоті обертання. За допомогою СТЕП, буде відбуватися отримання значень параметрів установки з  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $A$  – відповідно напруга тахогенератора, лінійна напруга та струм в одній з фаз.

#### **5.4 Методичні вказівки до виконання роботи**

Для проведення лабораторних досліджень подаємо напругу на експериментальну установку за допомогою ввімкнення автоматичного вимикача QF, світова індикація HL сигналізуватиме про наявність напруги.

Після подачі напруги через декілька секунд стенд готовий до роботи. Для початку роботи потрібно натиснути кнопку Start на панелі управління перетворювача частоти, або за допомогою тумблера на передній панелі лабораторного стенда. При обертанні в прямому або протилежному до нього

напрямку горить відповідно SF та SR індикація. Збільшення частоти обертання двигуна здійснюється поворотом потенціометра зліва направо, де крайнє ліве положення відповідає 0 Гц, крайнє праве – 50 Гц.

На панелі виведено три комплекта виводів  $V_{тг}$ ,  $V_{л}$ ,  $I$ , які дозволяють знімати відповідно значення сигналу напруг тахогенератора та лінійної напруги, струму в одній з фаз. Зверніть увагу, для зняття сигналу струму потрібно зняти шунт, для запобігання короткого замикання. Для зняття даних використовується кафедральна установка «Система тестування електроприводів» (СТЕП) з встановленим на ноутбук програмним забезпеченням Visualizer 2. Далі потрібно підключити відповідні виходи X1 – X3 на задній панелі СТЕП, увімкнути її та в ПЗ підключити та вибрати відповідні підключені входи для зняття даних з експериментального стенда.

Для регулювання навантаження використовується ручка навантажувального пристрою, величину якого вимірюємо за допомогою динамометра і рекомендується вибирати в межах 200-240 Н.

На рис.5.3 представлені основні види характеристик  $U/f$  перетворювача частоти.

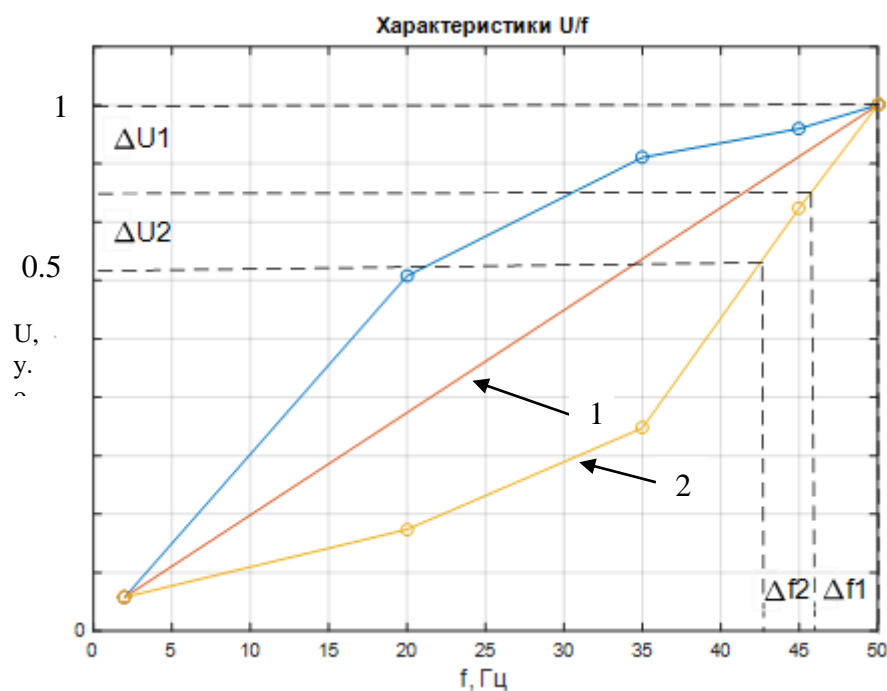


Рисунок 5.3 – Різновиди характеристик  $U/f$

Налаштування і знаходження відповідних значень напруг та частот проводяться за наступним алгоритмом: виконується аналіз графіків перехідних процесів моделювання зміни напруги та моменту у відповідні проміжки часу; побудова залежності  $U=f(M_c)$ ; на основі якого для деяких рівнів навантажень проводиться знаходження діапазону зміни напруги та мінімальні значення діапазону зміни частоти, налаштування нової  $u/f$  характеристики при якій падіння швидкості конвеєрної стрічки буде лежати в межах норми 5-10%, але з досягненням зменшення рівня енергетичних витрат.

Для змінення параметрів та налаштування перетворювача частоти використовуються групи параметри В, Е, Н, Р. Для введення кривої завдання  $U/f$  потрібно виставити параметр  $b06=0$ , для відкриття параметрів  $b03 - b13$ , які представлені нижче на рис. 5.4.

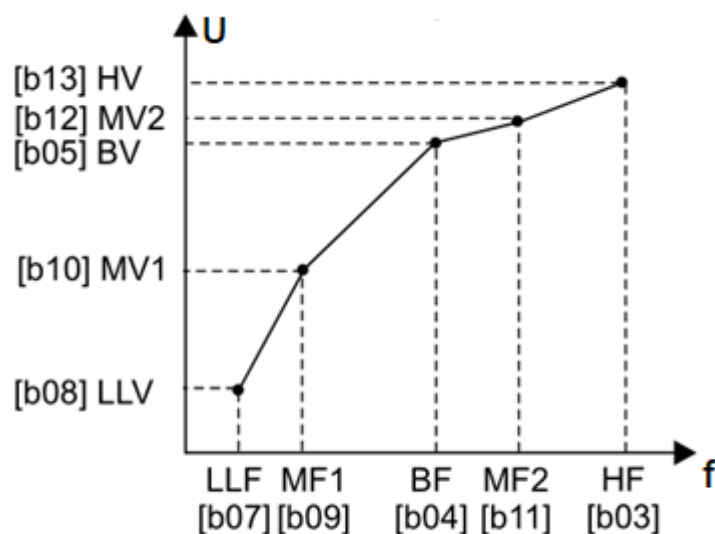


Рисунок 5.4 – В-параметри  $U/f$  характеристики

Слід звернути увагу, що спочатку потрібно задати  $b04$  та  $b05$  – як базовий, а всі інші параметри задавати в межах 20 – 120% значення  $b04$  для каналу напруг. Для значень частоти використовується діапазон 0 – 50 Гц.

## 5.5 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

1. Титульний аркуш.
2. Програма роботи.
3. Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
4. Таблиці зі знятими експериментальними даними.
5. Побудовані графіки та характеристики.
6. Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

## **Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт в лабораторії «Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів»**

Перед початком лабораторних робіт проводиться інструктаж з правил безпеки згідно з інструкцією з охорони праці, затвердженою розпорядженням декана ФЕА. Після вивчення і перевірки знань цієї інструкції прізвище кожного студента заноситься до контрольного листа, де він ставить свій особистий підпис.

Під час виконання лабораторної роботи студентам забороняється:

- заходити за огороження робочих місць, торкатися неізольованих струмопровідних частин обладнання, а також конструкцій обладнання, які обертаються;
- збирати схеми або робити перемикання в них, усувати недоліки без відключення установки;
- підніматися на фундаменти машин;
- стояти поряд з незахищеними кожухами, муфтами, дисками та частинами машин, що обертаються;
- підключати та знімати з'єднувальні провідники під напругою;
- розбирати схеми не викручуючи клеми, виривати з'єднувальні провідники із клем;
- приєднувати провідники до приладів, машин та апаратів без напаяних наконечників;
- користуватися реостатами з поганими контактами;
- робити переключення на головних (розподільних) щитах;
- вмикати вимикачі для включення напруги до перевірки викладачем правильності з'єднань у схемі;
- виконувати лабораторну роботу одному.

Студенти зобов'язані:

– перед включенням схеми перевірити, в якому положенні знаходиться решта членів бригади (чи торкається хто-небудь до струмопровідних частин або до частин машин, які можуть обертатися) та попередити голосом: «Обережно, вмикаю!»;

– не залишати лабораторну установку без нагляду, постійно спостерігати за її справною роботою.

Після закінчення роботи необхідно відключити лабораторну установку, розібрати схему, навести порядок на робочому місці, повідомити викладача про всі неполадки (якщо вони є), виявлені під час роботи.

## Список рекомендованої літератури

1. М.Г.Попович, О.І.Кіселичник, “Електромеханічні системи автоматичного керування робочими параметрами турбомеханізмів на основі принципу пасивності”/ Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Вісник НТУ”ХП”, Випуск 43, 2004. с.16-19.
2. Теорія електропривода: Підручник/ М.Г.Попович, М.Г.Борисюк, В.А.Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г.Поповича. –К.: Вища школа, 1993. –494с.
3. М.Г. Попович, В.В. Кострицький. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія та практика). Навчальний посібник. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.: - Бібліогр.: 402 с. Укр. мовою.
4. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. –М.: Энергоатомиздат, 1991. -144с.
5. Grundfos – WinCAPS версія 7.41, CD.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э.Кравчик, М.М.Шлаф, В.И.Афонин, Е.А.Соболенская. –М.: Энергоиздат, 1982. –504с.
7. Підйомні установки: Навчально-методичний посібник/ М.Г. Попович, Б.М. Мацко. – Київ, НТУУ «КПІ» - 2002. – 149 с.
8. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Учебник. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
9. Теорія електропривода / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г.Поповича. Підручник. - К.: Вища школа, 1993. -494с.
- 10.Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. Навчальний посібник. - К.: Либідь, 2005. – 680 с.
- 11.Елементи автоматизованого електропривода/ М.Г.Попович, В.А.Гаврилюк, О.В.Ковальчук, В.І.Теряєв. Навчальний посібник. – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.
- 12.Паспорт перетворювача частоти ACS 550 Single Drive фірми АВВ.